

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Pasivní a aktivní bezpečnostní systémy jaderných
elektráren III. generace

Passive and Active Security Systems in Nuclear Power
Plant III. Generation

Student: Milan Polášek

Vedoucí bakalářské práce: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Milan Polášek**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení
Téma: Pasivní a aktivní bezpečnostní systémy jaderných elektráren
III. generace
Passive and Active Security Systems in Nuclear Power Plant
III. Generation

Zásady pro vypracování:

Na základě studia literatury popište a analyzujte koncepci pasivních a aktivních bezpečnostních systémů jaderných elektráren III. generace. Vysvětlíte princip a technickou koncepci těchto systémů a zdůrazněte klady a zápory a rozdělte je podle vhodných kritérií.
Ve výpočtové části proveďte návrh odvodu zbytkového tepla z bazénu vyhořelého paliva pro jadernou elektrárnu MIR 1200, ve které je bazén umístěn uvnitř tlakového kontejnmentu. Stanovte tepelnou bilanci navrženého výměníku tepla a vypočtete jeho základní rozměry.

Seznam doporučené odborné literatury:

HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03190-X.
MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně, 2001. ISBN 80-214-2028-6.
HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03324-4.

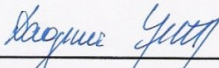
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013





prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu

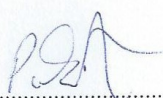
V Ostravě 20.5.2013


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20.5.2013


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Milan Polásek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Karviná, Havířská 1187, 735 06

ANOTACE

POLÁŠEK, M. *Aktivní a pasivní bezpečnostní systémy jaderných elektráren III. generace: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2013 66 s. Vedoucí práce: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Bakalářská práce se zabývá analýzou aktivních a pasivních bezpečnostních systémů projektů MIR-1200 a AP1000. V úvodu je rozepsáno, jak na tom je jaderná energetika u nás v České republice a ve světě. Následující kapitoly se věnují podrobným popisem některých pasivních bezpečnostních systémů již zmiňovaných projektů a detailním rozбором, jak se určité jaderné havárie řeší. Praktická část se věnuje návrhu odvodu tepla z bazénu na vyhořelé palivo za pomoci tepelného výměníku. Výpočty zahrnují stav s použitím výměníku a bez výměníku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Jaderná elektrárna, jaderná havárie, bezpečnost, vyhořelé palivo, teplota vody v bazénu, výměník tepla.

ANNOTATION

POLÁŠEK, M. *Passive and Active Security Systems in Nuclear Power Plant III. Generation: bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy, 2013 66 p. Supervisor: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

The Bachelor thesis deals with the analysis of active and passive safety systems projects MIR-1200 and AP1000. The current situation in terms of nuclear power, regarding the Czech Republic and the world in general, is written in the introduction. The following chapters are devoted to a detailed description of mentioned safety systems and to a detailed study of solutions for certain nuclear accidents. The practical part is focused on heat removal from the spent-fuel pool using a heat exchanger. The calculations are conducted for both conditions, using a heat exchanger and without it.

KEYWORDS

Nuclear power plant, nuclear accident, safety, spent fuel, water temperature in the pool, heat exchanger.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN.....	8
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	11
SEZNAM TABULEK.....	12
1 ÚVOD.....	13
2 ORGÁNY ZABÝVAJÍCÍ SE JADERNOU BEZPEČNOSTÍ.....	14
2.1 IAEA – International atomic energy agency	14
2.2 SJÚB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost	14
3 MEZINÁRODNÍ STUPNICE INES.....	17
3.1 Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných havárií.....	17
3.2 Kritéria hodnocení	17
3.3 Seznam havárií	18
4 REAKTORY III. GENERACE A JEJICH BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY.....	20
4.1 Westinghouse AP1000	20
4.1.1 Společnost WESTINGHOUSE	20
4.1.2 Konstrukce a parametry	21
4.1.3 Aktivní bezpečnostní systémy.....	24
4.1.4 Pasivní bezpečnostní systémy	24
4.1.5 Řešení havárií	28
4.2 Atomstroyexport MIR-1200	32
4.2.1 Společnost Atomstroyexport	32
4.2.2 Konstrukce a parametry	33
4.2.3 Aktivní bezpečnostní systémy.....	36
4.2.4 Pasivní bezpečnostní systémy	36
5 NÁVRH ODVODU ZBYTKOVÉHO TEPLA Z BAZÉNU ELEKTRÁRNY MIR-1200 ...	40
5.1 Teorie sdílení tepla	40
5.1.1 Obecné poznatky	40
5.1.2 Sdílení tepla prouděním (konvekci)	40
5.2 Výměník tepla.....	41
5.2.1 Rozdělení výměníků tepla	41
5.3 Vyhořelé palivo	42
5.3.1 Složení vyhořelého paliva	42

5.3.2	Zbytkové teplo vyhořelého jaderného paliva	44
5.4	Systém smyčkových tepelných trubíc	44
5.4.1	Tepelná trubice	44
5.4.2	Termická analýza smyčkové tepelné trubice	45
5.5	Prostup tepla povrchem s žebry	48
5.6	Výpočtová část	50
5.6.1	Kondenzátor	51
5.6.2	Výparník	53
5.6.3	Výpočet celkového potřebného odporu	55
5.6.4	Výpočet chlazení vody v bazénu	56
5.6.5	Výpočet ohřevu bez ochlazení	56
5.7	Souhrnné schéma	57
6	ZÁVĚR	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	59
	SEZNAM PŘÍLOH	62

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

Značka	Název veličiny	Jednotka
A	Velikost žebrované plochy	m^2
A_c	Celková plocha žebrovaného povrchu trubky	m^2
A_{ci}	Vnitřní plocha kondenzátoru	m^2
A_{co}	Vnější plocha kondenzátoru	m^2
A_{ei}	Vnitřní plocha výparníku	m^2
A_{eo}	Vnější plocha výparníku	m^2
A_f	Plocha žeber	m^2
A_o	Plocha kondenzátorové trubky	m^2
A_{tei}	Vnitřní plocha trubky výparníku	m^2
A_{teo}	Vnější plocha trubky výparníku	m^2
A_{tci}	Vnitřní plocha trubky kondenzátoru	m^2
A_z	Plocha povrchu žeber	m^2
c_{pa}	Měrná tepelná kapacita vzduchu	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
c_{pl}	Měrná tepelná kapacita kapaliny	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
D_{ci}	Vnitřní průměr tepelné trubice kondenzátoru	m
D_{co}	Vnější průměr tepelné trubice kondenzátoru	m
D_{ei}	Vnitřní průměr tepelné trubice výparníku	m
D_{eo}	Vnější průměr tepelné trubice výparníku	m
D_i	Vnitřní průměr trubky	m
D_o	Vnější průměr trubky	m
G_{\max}	Maximální hmotnostní proudění vzduchu	kg.s^{-1}
G_r	Grashofovo kritérium	-
g	Gravitační zrychlení	m.s^{-2}
k	Tepelná vodivost trubky	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
k_c	Tepelná vodivost kondenzační trubky	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
k_e	Tepelná vodivost výparníkové trubky	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

k_z	Součinitel přestupu tepla žebrovaným povrchem	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
L	Délka trubky	m
L_c	Délka tepelné trubice kondenzátoru	m
L_e	Délka tepelné trubice výparníku	m
l_c	Latentní teplo	$^{\circ}\text{C},\text{K}$
m	Množství vody v bazénu	l
Nu	Nusseltovo kritérium	-
n_c	Počet trubek kondenzátoru	-
n_e	Počet trubek výparníku	-
n_s	Počet potřebných smyček	-
P_i	Vnitřní tlak tepelné trubice	Pa
P_o	Vnější tlak tepelné trubice	Pa
Pr	Prandtlovo kritérium	-
Q	Tepelný tok	W
Q_{VJP}	Tepelný výkon vyhořelého jaderného paliva	W
Q_o	Zbytkové teplo na jednu smyčku	W
q_c	Tepelný tok v kondenzátoru	W
q_e	Tepelný tok ve výparníku	W
R_1	Tepelný odpor jedné smyčky	K.W^{-1}
R_{cond}	Kondukční tepelný odpor	K.W^{-1}
R_{conv}	Konvenční tepelná odpor	K.W^{-1}
Re	Reynoldsovo číslo	-
R_o	Celkový tepelný odpor	K.W^{-1}
$R_{\text{potř}}$	Potřebný odpor pro celý systém	K.W^{-1}
T	Časová konstanta	s
T_m	Střední teploty vody	$^{\circ}\text{C},\text{K}$
T_w	Teplota vody ve výparníku	$^{\circ}\text{C},\text{K}$
T_{∞}	Teplota vody v bazénu při přirozeném proudění	$^{\circ}\text{C},\text{K}$
t_{ls}	Střední hodnota teplejšího a chladnějšího média	$^{\circ}\text{C},\text{K}$
t_a	Teplota teplejšího média	$^{\circ}\text{C},\text{K}$

t_b	Teplota chladnějšího média	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
t_{τ}	Teplota za čas	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
α_A	Součinitel přestupu tepla s teplosměnnou plochou A	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
α_c	Součinitel přestupu tepla při kondenzaci	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
α_{c-a}	Součinitel přestupu tepla z kondenzátoru do okolí	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
α_e	Součinitel přestupu tepla při varu ve výparníku	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
α_{w-e}	Součinitel přestupu tepla z vody do výparníku	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
α_i	Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubky	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
α_z	Součinitel přestupu tepla na žebrované straně	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
β	Tepelná roztažnost	K^{-1}
δ_w	Tloušťka stěny trubky	m
η_o	Celková účinnost žebra	%
λ_a	Součinitel tepelné vodivosti vzduchu	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
λ_l	Součinitel tepelné vodivosti kapaliny	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
λ_w	Součinitel tepelné vodivosti materiálu trubky	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
μ_a	Dynamická viskozita vzduchu	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
μ_l	Dynamická viskozita kapaliny	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
μ_{∞}	Dynamická viskozita vody v bazénu při přirozeném proudění	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
μ_w	Dynamická viskozita vody ve výparníku	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
ν_a	Kinematická viskozita vzduchu	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
ν_l	Kinematická viskozita kapaliny	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
ρ_l	Hustota kapaliny	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ρ_v	Hustota páry	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Ω	Účinnost žebra	%
ω_a	Rychlost proudu vzduchu	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
ΔT	Rozdíl teplot vody v bazénu	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 3-1: Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí [6]	18
Obrázek 4-1: 3D model jaderné elektrárny s reaktorem AP1000 firmy Westinghouse [7]	20
Obrázek 4-2: Srovnání zmenšení počtu komponent u AP1000 oproti PWR 1000 [9]	22
Obrázek 4-3: 3D model pasivního systému chlazení aktivní zóny a odvodu zbytkového tepla jaderného reaktoru AP1000 [13]	25
Obrázek 4-5: Schéma pasivního systému chlazení kontejnmentu [17]	27
Obrázek 4-6: Princip řešení havárie s tavením aktivní zóny [18]	30
Obrázek 4-7: 3D model jaderné elektrárny s reaktorem MIR-1200 [19]	31
Obrázek 4-8: Schéma pasivního systému odvodu tepla z kontejnmentu projektu MIR-1200 [21]	36
Obrázek 4-9: 3D model pasivního odvodu tepla z parogenerátorů a z kontejnmentu [21]	37
Obrázek 4-10: Lapač roztavené aktivní zóny a systém plnění vodou [21]	38
Obrázek 5-1: Množství izotopů ve vyhořelém jaderném palivu [vlastní tvorba]	42
Obrázek 5-2: Princip tepelné trubice [29]	44
Obrázek 5-3: Osový řez trubkou s kruhovými radiálními žebry [30]	48
Obrázek 5-4: Půdorys kontejnmentu projektu MIR-1200 [19]	49
Obrázek 5-5: Rozměry bazénu + navrhované zjednodušené schéma systému smyčkových tepelných trubic [31]	50
Obrázek 5-6: Rozměry kondenzátoru a výparníku [31]	51
Obrázek 5-7: Konstrukce výparníkové trubky [29]	52
Obrázek 5-8: Odporové schéma s vypočtenými hodnotami [29]	56
Obrázek 6-1: Graf znázorňující závislost teploty vody v bazénu na čase ve dvou případech [29]	57

SEZNAM TABULEK

Tabulka 4-1: Základní technické parametry jaderné elektrárny AP1000 [5]	23
Tabulka 4-2: Základní technické parametry jaderné elektrárny MIR-1200 [20]	33
Tabulka 5-1: Součinitele pro Nussoltovo kritérium [30]	47

1 ÚVOD

Během příštích let se zvýší celosvětová poptávka po elektrické energii. Je důležité, snažit se o zvýšení účinnosti výroby energie. To však nezaručuje, že se výroba elektrické energie bude rovnat požadované poptávce. Státy, které nechtějí být závislé na surovinách jiných zemí, mohou v současné době k výrobě elektřiny využít jen uran nebo uhlí. Pokud zvážíme, že při použití fosilních paliv se vypustí obrovské množství CO_2 do ovzduší, tak jaderná energetika je nejhleduplnější zdroj energie v současnosti.

Ve spoustě zemí se proti jaderné energii objevují neustálé námitky. Velkou roli hraje spojitost s jadernými zbraněmi a velké havárie, které se stali v Černobylu a Fukušimě. Avšak všechny možné zdroje energie nesou nějaká rizika, ať už jde o přepravu paliv, ukládání odpadu nebo formou škodlivých emisí.

Kvůli rozšířené výstavbě jaderných elektráren po světě se zvyšují požadavky na bezpečnost. Největší společnosti (např. Westinghouse nebo Atomstroy export), které se zabývají jaderným průmyslem, pracují na vývoji jaderných reaktorů v oblasti zvýšení výkonu, účinnosti a hlavně na zvýšení jaderné a technické bezpečnosti. V současné době se řeší dostavba jaderných bloků v jaderné elektrárně Temelín. Velkými favority jsou projekty MIR-1200 a AP1000, které jsou ve výstavbě už jinde ve světě (např. Finsko, Čína, Francie nebo Rusko). V plánu jsou výstavby desítky nových jaderných bloků. V budoucnu lze očekávat velký nárůst nových jaderných elektráren po celém světě. O výstavbě totiž uvažují i státy, které dosud jadernou energetiku odmítali a odsuzovali. Zároveň se pracuje na prodloužení životnosti jaderných elektráren a tím se zvyšuje bezpečnost a také zájem o tento zdroj elektrické energie. V současnosti probíhá modernizace jaderných elektráren Dukovany a Temelín, kde se předpokládá životnost až 60 let.

V této práci provádím analýzu aktivních a pasivních bezpečnostních systémů jaderných elektráren již zmíněných projektů. Popisuji společnost, která daný projekt navrhla a následně vysvětluji, na jakém principu bezpečnostní systémy pracují. Ve výpočtové části se zabývám jedním z pasivních systémů. Jde o návrh odvodu tepla z bazénu na vyhořelé palivo za pomoci tepelného výměníku.

2 ORGÁNY ZABÝVAJÍCÍ SE JADERNOU BEZPEČNOSTÍ

2.1 IAEA – International atomic energy agency

Tato agentura se specializuje na vydávání dokumentů. Základní dokumenty se nazývají IAEA Safety Standard Series. Hlavním dokumentem je IAEA Safety Fundamentals, který stanovuje nejzákladnější bezpečnostní cíle jako je ochrana obyvatelstva a životního prostředí před škodlivými radioaktivními látkami a ionizujícím zářením.

Tyto cíle jsou rozvinuty do následujících bezpečnostních principů:

- Odpovědnost za jadernou bezpečnost
- Role státu
- Řízení jaderné bezpečnosti
- Důvod k užívání jaderné energie
- Optimalizace ochrany
- Omezení rizik
- Ochrana současné a budoucí generace
- Prevence havárií
- Havarijní připravenost a odezva
- Nápravné akce k omezení existujících a dosud nenalezených radiačních rizik

Na již zmíněný základní dokument navazuje dokument IAEA Safety Requirements (NS-R). Pro JE jsou nejdůležitější dokumenty NS-R-1 (design jaderných elektráren), NS-R-2 (provoz jaderných elektráren) a NS-R-3 (výběr vhodné lokality pro jadernou lokalitu).

Dokumenty IAEA nejsou nijak legislativně závazné. Ale státní orgán, který dohlíží na jadernou bezpečnost, je bere v potaz a zpracovává je do vlastních vyhlášek, které jsou již pro dané instituce a stát závazné. [1]

2.2 SJÚB - Státní úřad pro jadernou bezpečnost

Kontrolní úřadem, který se zabývá jadernou bezpečností u nás v České republice, je Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Tento úřad vznikl v den vzniku České republiky, tedy 1.1.1993. Zabývá se radiační, chemickou a biologickou ochranou. Předsedkyní tohoto úřadu je Ing. Dana Drábová, Ph.D.

SÚJB je rozdělen na tři oddíly:

- Úsek radiační ochrany
- Úsek jaderní bezpečnosti
- Úsek řízení a technické podpory

SÚJB dohlíží na jadernou bezpečnost, která je definována podle atomového zákona o mírovém využití jaderné energie a ionizujícího záření. Na základě tohoto zákona dává Úřad pro jadernou bezpečnost povolenku fyzickým či právnickým osobám ke stavbě jaderného zařízení a k jeho provozování. Zároveň vydává povolení k manipulaci jaderného paliva a radioaktivních odpadů. SÚJB dohlíží na veškeré instituce, které mají v provozu jaderné zařízení. Kontrolují nejen JE v České republice, ale také instituce, ve kterých je používán rentgen (např. nemocnice) nebo kde se ukládá jaderný odpad. Zabývá se tedy především dodržování jaderné bezpečnosti u jaderných zařízení. Dohlíží, jak je provozovatel jaderného zařízení připraven na jadernou poruchu či havárii. V jaderných elektrárnách se některé jaderné havárie simulují. K těmto simulacím posílá SÚJB svou komisi a dohlíží na to, aby vše proběhlo správně.

Mezi nejdůležitější vyhlášky týkající se stavby a provozu jaderných elektrárny patří:

- č. 215/1997 Sb. – výběr lokality pro jadernou elektrárnu
- č. 195/1999 Sb. – design jaderné elektrárny
- č. 132/2008 Sb. – jakost při výrobě a projektování komponent
- č. 144/1997 Sb. – fyzická ochrana
- č. 146/1997 Sb. – výcvik personálu
- č. 307/2002 Sb. – radiační ochrana
- č. 318/2002 Sb. – havarijní připravenost
- č. 106/1998 Sb. – zajištění bezpečnosti při uvádění jaderné elektrárny do provozu
- č. 185/2003 Sb. – vyřazení jaderné elektrárny z provozu

SÚJB stanovuje licenční proces projektu u nové jaderné elektrárny, ten se skládá z těchto základních bodů:

- Povolení umístění
- Povolení k výstavbě
- Povolení k uvedení do provozu
- Povolení k provozu

Součástí povolení k umístění je bezpečnostní zpráva, která hodnotí danou lokalitu podle vyhlášky č. 215/1997 Sb. V povolení k výstavbě je obsažena předběžná bezpečnostní zpráva, ve které hodnotí daný projekt dle jaderné bezpečnosti a včleňuje také vnější rizika.

Předprovozní bezpečnostní zpráva je součástí povolení k uvedení do provozu a povolení k provozu. Dále je to i její revize. Ve zprávě jsou hodnoceny projektové změny při výstavbě, kvalita provedení, atd. Do aktivit SÚJB patří také dozor nad dodržováním zákona o zákazu bakteriologických, toxinových a chemických zbraní. V situaci, že instituce nebude dodržovat tyto zákony, tak Státní úřad pro jadernou bezpečnost má pravomoc ke stanovení pokuty nebo v nejhorším případě odebrání povolení k provozu jaderného zařízení. [2]

3 MEZINÁRODNÍ STUPNICE INES

3.1 Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných havárií

Nejčastější otázkou je, co může taková havárie jaderné elektrárny způsobit a jestli k tomu může vlastně někdy dojít. Takové posuzování událostí je velice složité, často může dojít ke špatnému zhodnocení a zejména při špatném odhadu následků může dojít ke katastrofě. Proto zavedla agentura IAEA (International Atomic Energy Agency), česky zvaná Mezinárodní agentura pro atomovou energii, stupnici INES (The international Nuclear Event Scale), kterou můžeme vidět na obrázku č. 3-1. Ta hodnotí v sedmi stupních události havárie. Stupnice slouží ke srozumitelnému a rychlému informování členských zemí o závažnosti nehod.

3.2 Kritéria hodnocení

Hodnocení událostí se vztahuje na tři hlavní kritéria:

Dopad na životní prostředí

Podle tohoto kritéria se hodnotí únik radioaktivních látek do okolí mimo elektrárnu. Jde o třídy 3 až 7. Kde třída 3 znamená minimální únik radioaktivních látek do okolí, který by pro zasažené obyvatele znamenal dávku záření odpovídající zlomku předepsaného ročního limitu. Třída 7 znamená velkou jadernou havárii, která by měla obrovské následky na životní prostředí a zdraví obyvatel.

Dopad na záření a prostředí uvnitř elektrárny

Toto kritérium hodnotí stav aktivní zóny a únik radioaktivních látek uvnitř elektrárny. Jde o třídy 3 až 5. Kde třída 3 znamená nadměrné zamoření elektrárny nebo ozáření pracovníků. Třída 5 představuje situace velkého poškození aktivní zóny jaderného reaktoru.

Dopad na bezpečnostní systémy

Používá se pro události, které ohrožují soustavy aktivních či pasivních bezpečnostních systémů, které mají bránit uvolněním radioaktivních látek z reaktoru do prostředí elektrárny a ven do okolí. Zařazují se do tříd 3 až 1.

Každá nehoda je vždy hodnocena podle všech těchto kritérií. Při uplatnění INES stupnice se prokázalo, že většina nahlášených událostí jsou pod úrovní třídy 3. [3], [4], [5]



Obrázek 3-1: Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí [6]

3.3 Seznam havárií

Havárie:

7 – Velká havárie (Major accident)

- Jedná se o únik obrovského množství radioaktivních látek z aktivní zóny reaktoru ven mimo elektrárnu.
- Mohou vzniknout okamžité zdravotní následky. Zdravotní následky se můžou projevit i později v případě, že se dotyčný pohyboval mimo okolí elektrárny.
- Dlouhodobý dopad na životní prostředí.

6 – Závažná havárie (Serious accident)

- Únik radioaktivních látek ven mimo elektrárnu, ale ne už v tak velkém množství jako u třídy 7.
- Aby se omezilo vzniku zdravotních následků je důležité úplné použití havarijních plánů.

5 – Havárie s účinky na okolí (Accident with off-site risks)

- Únik radioaktivních látek ven mimo elektrárnu s menším množstvím než u třídy 6.
- Větší část aktivní zóny je poškozena mechanicky nebo tavením.
- Aby se omezilo ke vzniku zdravotních následků, je třeba použít havarijní plány (např. ukrytí do bezpečných krytů nebo evakuace)

4 – Havárie s účinky v jaderném zařízení (Accident mainly in installation)

- Malý únik radioaktivních látek ven mimo elektrárnu, jehož následkem je dávka na hranici limitů předepsaných pro veřejnost.
- Aktivní zóna v reaktoru je zlomkově poškozena mechanicky nebo tavením. Dochází k ozáření pracovníků a tím k okamžitým zdravotním potížím.
- Havarijní opatření mimo elektrárnu není potřeba, výjimkou jsou ale kontroly potravy.

PORUCHY

3 – Vážná porucha (Serious incident)

- Dochází k úniku radioaktivních látek nad povolené limity. Následkem je dávka ve zlomku limitů povolených pro veřejnost. Mimo elektrárnu nejsou potřeba žádná speciální opatření.
- Vysoké úrovně úniku radioaktivních látek z aktivní zóny uvnitř elektrárny z důvodu provozních poruch nebo selhání zařízení. Pracovníci jsou nadměrně ozáření.

2 – Porucha (Incident)

- Technické poruchy, které výrazně neovlivňují bezpečnost elektrárny, Ale mohou vést k přehodnocení situace.

1 – Odchylka (Anomaly)

- Provozní odchylky, které nepředstavují žádné riziko, ale odhalují nedostatky bezpečnostních systémů. Ty mohou být způsobeny špatným postupem při práci nebo chybou pracovníka.

0 – Událost pod stupnicí (Zero level event-below scale)

- Nejsou překročeny žádné provozní limity a jsou bezpečně řešitelné pomocí vhodných postupů. [3], [4], [5], [6]

4 REAKTORY III. GENERACE A JEJICH BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY

4.1 Westinghouse AP1000



1 – Zóna manipulace s palivem, 2 – Betonová ochranná obálka, 3 – Ocelová ochranná obálka, 4 – Nádrž s vodou pro havarijní chlazení, 5 – Parogenerátory, 6 – Hlavní cirkulační čerpadla, 7 – Reaktorová nádoba, 8 – Horní blok reaktoru, 9 – Kompenzátor objemu, 10 – Velín, 11 – Čerpadla napájecí vody, 12 – Strojovna

Obrázek 4-1: 3D model jaderné elektrárny s reaktorem AP1000 firmy Westinghouse [7]

4.1.1 Společnost WESTINGHOUSE

George Westinghouse uznávaný ve své době jako „největší žijící inženýr“ založil v roce 1886 Westinghouse Electric Company. Sám se proslavil jako vynálezce pneumatické brzdy pro vlaky. Společnost se po založení proslavila zavedením systému rozvodu střídavého proudu.

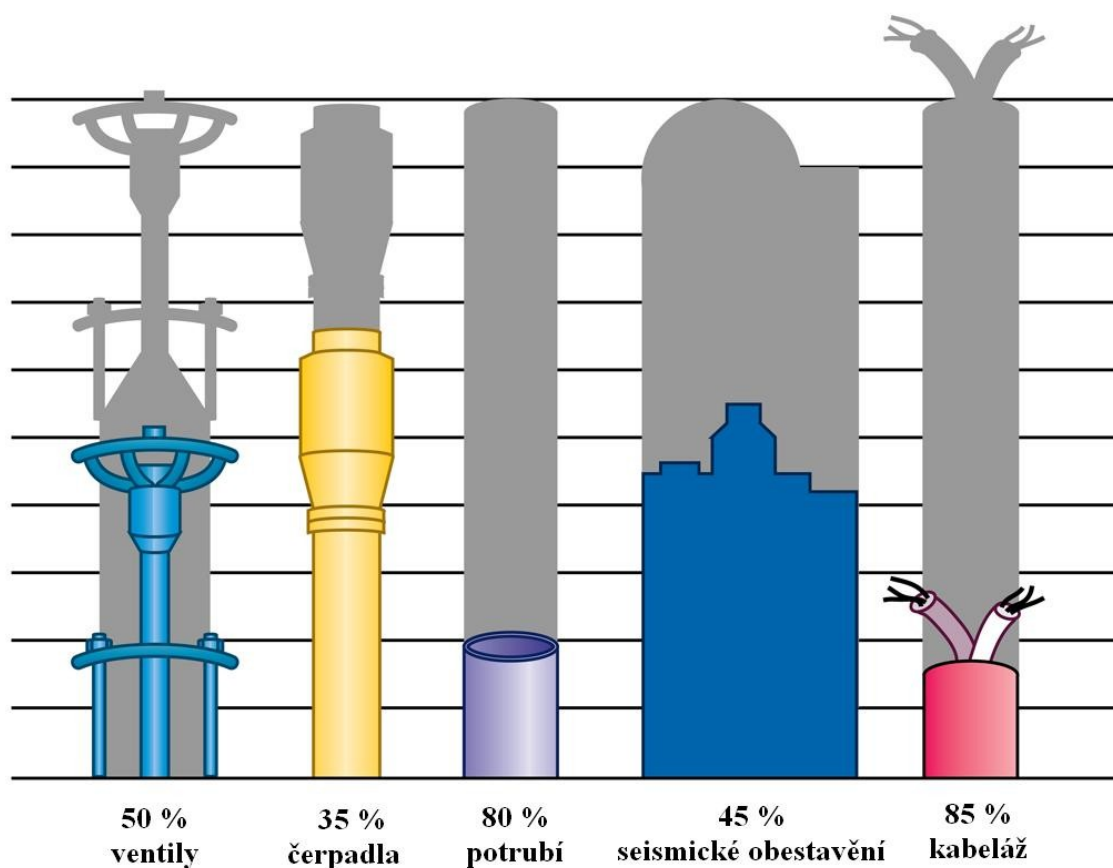
Hlavní vizí společnosti je dodávat tu nejmodernější jadernou technologii a uspokojit rostoucí světovou poptávku po energii. V této oblasti má více jak 50 let zkušeností. Téměř 50 procent jaderných elektráren na světě, které jsou v provozu a téměř 60 procent v USA jsou založené na technologii Westinghouse. Společnost se zaměřuje na 4 oblasti:

- Jaderná automatizace
- Jaderné palivo
- Jaderný servis
- Jaderné elektrárny

Nyní je vrcholem výzkumu a vývoje společnosti Westinghouse jaderná elektrárna s reaktorem AP1000. [8]

4.1.2 Konstrukce a parametry

AP1000 vychází konstrukčně z AP600 a je nejekonomičtější a nejbezpečnější jadernou elektrárnou na světovém trhu. Nabízí osvědčenou technologii a inovativní prvky zejména v oblasti bezpečnosti. Pro AP1000 je charakteristické snižování počtu komponent celé elektrárny. Na obrázku č. 4-2 lze vidět o jaké množství se jednotlivé komponenty snížily. Nejvíce ubylo potrubí a kabeláže. U těchto komponent ubylo množství až o 80% oproti PWR1000. Zjednodušení systémů oproti jaderné elektrárně s reaktorem PWR1000 je dost značné, zároveň jsou zajištěny funkce bezpečnostních i provozních systémů. V tabulce č. 4-1 jsou uvedeny základní technické parametry jaderné elektrárny s reaktorem AP1000.



Obrázek 4-2: Srovnání zmenšení počtu komponent u AP1000 oproti PWR 1000 [9]

Je důležité zmínit, že výstavba jaderné elektrárny s reaktorem AP1000 je založena na technice modulární konstrukce. Ta je definována tak, že je elektrárna sestavena z předem vyrobených modulů, které se potom doslova poskládají. Těchto modulů je asi 250 malých a 50 velkých. Největší výhodou této konstrukce je, že je možno tyto modely kromě reaktorové nádoby vyměnit, tím se dosáhne delší životnosti elektrárny, až 60 let. Další výhodou je časová flexibilita, kvalitnější výrobní práce a také úspora v ekonomické oblasti.

<u>Jaderná elektrárna</u>	
Instalovaný výkon	1117 MWe
Účinnost (čistá)	32,70%
Projektová životnost	60 let
<u>Reaktor</u>	
Tepelný výkon	3400 MWt
<u>Aktivní zóna</u>	
Palivo	obohacený uran v podobě UO ₂ (palivo obsahuje vyhořívající absorbátor gadolinium)
Obohacení	4,95%
Počet palivových souborů	157
Počet regulačních tyčí	53
Počet absorpčních tyčí	16
Palivový cyklus	18 měsíců
<u>Systém chlazení reaktoru</u>	
Počet chladících smyček	2
Pracovní tlak	17,2 MPa
Teplota chladiva na vstupu	281 °C
Teplota chladiva na výstupu	316 °C
Průtok chladiva reaktorem	19,8 m³/s
<u>Parogenerátor</u>	
Počet na výrobní blok	2
Odběr páry z 1 parogenerátoru	3397,4 t/hod
Tlak páry na výstupu	5,6 MPa
Teplota páry na výstupu	272 °C
<u>Kontejnement – vnitřní obálka</u>	
Průměr (vnitřní)	39,6 m
Tloušťka stěny	4,44 cm
Projektový tlak	0,407 MPa
<u>Kontejnement – vnější obálka</u>	
	- předepjatý beton
Výška	22 m
Průměr (vnitřní)	43 m
Tloušťka stěny	0,9 m (ve válcové části)
<u>Turbosoustroji</u>	
Počet na výrobní blok	1
Počet dílů turbíny	1 vysokotlaký + 3 nízkotlaké
Otáčky	1500

Tabulka 4-1: Základní technické parametry jaderné elektrárny AP1000 [5]

Součástí projektu AP1000 co se týče bezpečnosti je ochrana do hloubky. Ta má několik stupňů: I. Prevence havárií, II. Ochrana AZ (aktivní zóny), III. Ochrana životního prostředí a IV. Snížení následků havárií. Bezpečnostní systémy tohoto projektu se dělí na pasivní a aktivní. [5], [10], [11], [12]

4.1.3 Aktivní bezpečnostní systémy

Jsou definovány jako systémy, které se nepodílejí na řešení havárií. Aktivní bezpečnostní systémy jsou určeny pro normální provoz a řídí je kvalifikovaní pracovníci (v tomto případě jsou opakem pasivních bezpečnostních systémů). Tyto systémy zajišťují bezpečnost při nějakých přechodových jevech a méně významných událostí podle stupnice INES (viz kapitola 3). Výhodou u těchto systémů je, že jsou konstruovány a provozovány bez nutné časté údržby a testování. Zároveň je možno provádět tyto kontroly za provozu. Tím, že se aktivní bezpečnostní systémy přímo nepodílí na řešení havárií, není nutná tak velká záloha. Redundance těchto systémů je 2x 100 % což je nižší oproti projektům MIR-1200 a EPR, která činí 4x 100 %.

Mezi aktivní bezpečnostní systémy patří:

- Systém normálního doplňování primárního okruhu
- Systém odvodu zbytkového tepla při normálním provozu
- Systém pro kontrolu obsahu vodíku v kontejmentu
- Pomocné systémy napájecí vody
- Absorpční tyče šedé a černé pro řízení reaktivity za normálního provozu
- Klimatizace, ventilace, vytápění [5], [10], [11], [32]

4.1.4 Pasivní bezpečnostní systémy

Největší výhodou těchto systémů je, že nejsou závislé na činnosti člověka a vnějších a vnitřních zdrojích elektrické energie. Zároveň díky tomu, že vlastně nemůže dojít k selhání člověka nebo systémů výrazně snižují pravděpodobnost vzniku havárie. Co se týče selhání člověka, tak při těžkých haváriích u projektu AP1000 není potřeba zásah člověka po dobu až 72 hodin. Tyto systémy jsou založeny na přírodních silách, jako jsou např. přirozená cirkulace vzduchu, gravitace, Pascalův zákon apod.

Nejhlavnější pasivní bezpečnostní systémy:

- Pasivní systém chlazení aktivní zóny.
- Hermetičnost kontejnmentu.
- Pasivní systém chlazení kontejnmentu. [5], [14], [16]

4.1.4.1 Pasivní systém chlazení aktivní zóny

Tento systém plní dvě hlavní funkce:

- Bezpečné chlazení aktivní zóny
- Zajištění odvodu zbytkového tepla z reaktoru

Bezpečné chlazení zajišťují tyto systémy:

Core makeup tanks (CMT) – přídatné zásobování nádrže pro chlazení aktivní zóny

Accumulators (ACC) – akumulátory

In-containment refueling water storage tank (IRWST) – zásobovací nádrž vody určená k výměně paliva umístěná uvnitř kontejnmentu může sloužit i jako zásobovací nádrž pro chlazení při havárii LOCA

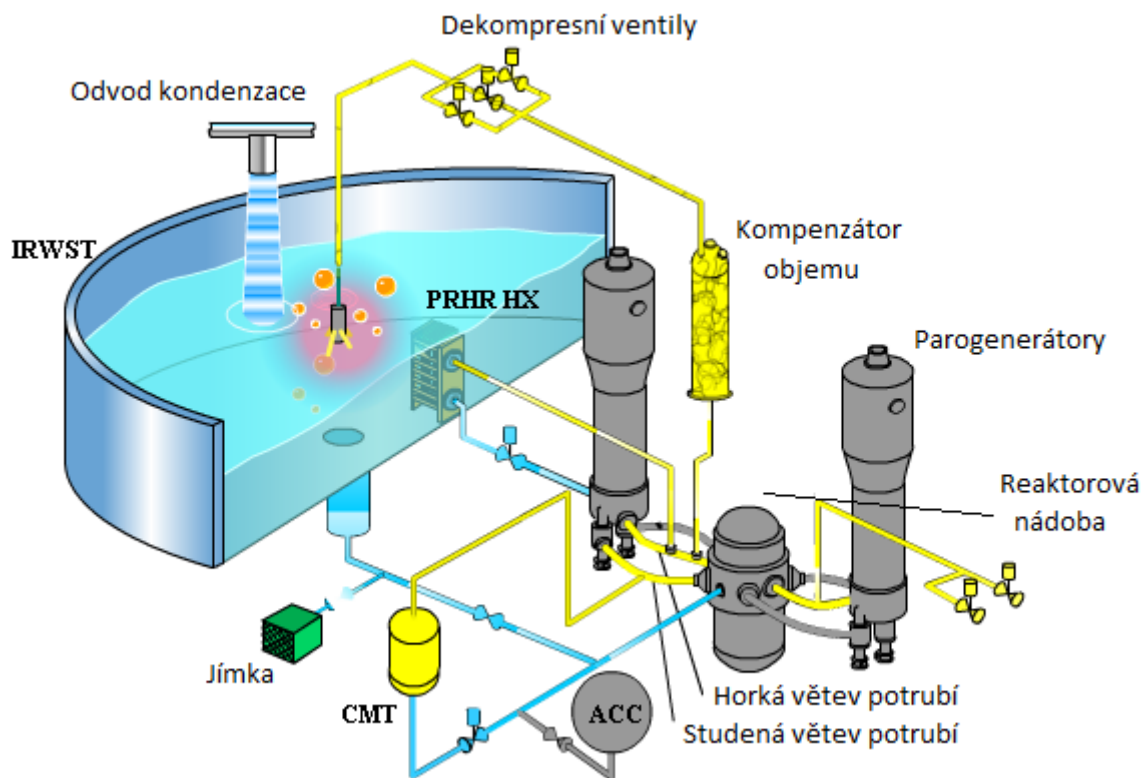
In-containment passive long-term recirculation – recirkulace vzduchu uvnitř kontejnmentu

Bezpečný odvod zbytkového tepla z reaktoru zajišťují tyto systémy:

Passive residual heat removal heat Exchangem (PRHR HX) - odvod zbytkového tepla zajišťuje pasivní výměník tepla

In-containment refueling water satorage tank (IRWST) - zásobovací nádrž vody určená k výměně paliva umístěná uvnitř kontejnmentu může sloužit i jako zásobovací nádrž pro chlazení při havárii LOCA

Projekt AP1000 řeší havárii typu LOCA za pomoci pasivních systémů chlazení aktivní zóny. Na obrázku 4-3 je 3D model těchto systémů pro chlazení aktivní zóny a odvodu zbytkového tepla jaderného reaktoru AP1000 s popisem jednotlivých částí. [5], [13], [32]



Obrázek 4-3: 3D model pasivního systému chlazení aktivní zóny a odvodu zbytkového tepla jaderného reaktoru AP1000 [13]

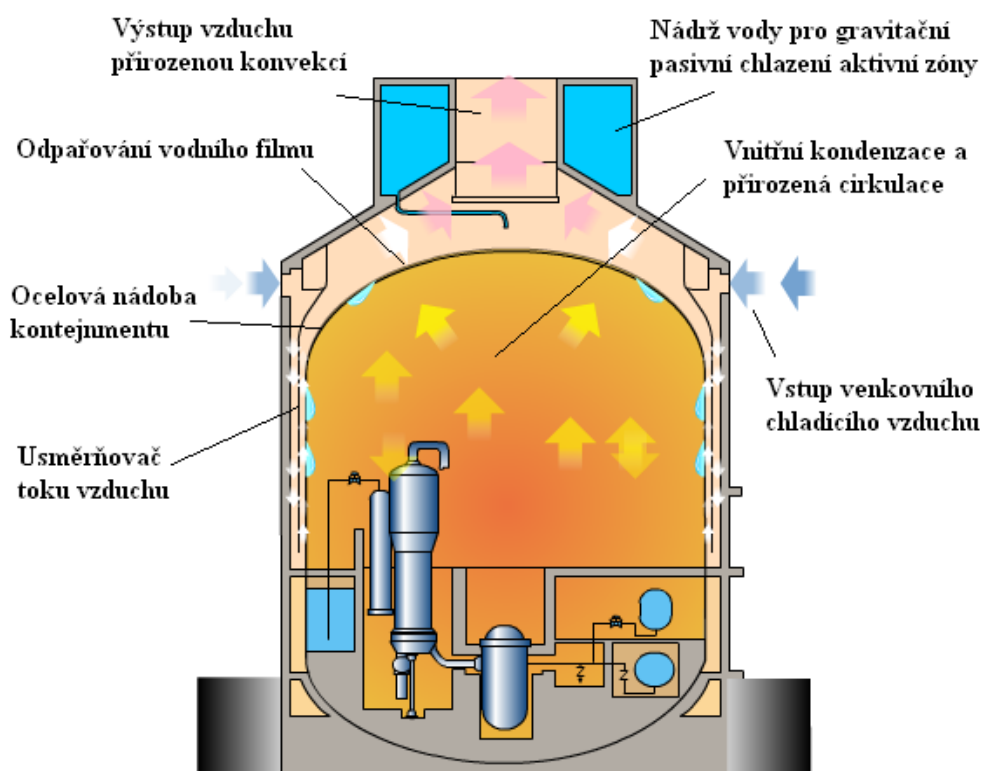
4.1.4.2 Hermitičnost kontejnmentu

Základním úkolem kontejnmentu je, aby neumožnil únik radioaktivních produktů štěpením a ionizujícího záření do okolního prostředí. Kontejnment je konstruován tak, aby nemohlo dojít k úniku jak plyných, tak i kapalných radioaktivních látek. To znamená, že je kontejnment hermeticky těsný. Bezpečnost je založena nejen na vnitřních haváriích, ale i vnějších. Mezi ně patří například zemětřesení, záplavy, tornádo, pád letadla nebo dokonce i teroristický útok. Chrání jaderný reaktor a primární okruh. [5], [15]

4.1.4.3 Pasivní systém chlazení kontejnmentu

Průřez kontejnmentu i s popisem je zobrazen na obrázku 4-5. Slouží proti přehřátí, překročení projektového tlaku a k udržení hermetičnosti. Je založen na přirozené cirkulaci vzduchu, která probíhá mezi železobetonovým a ocelovým kontejnmentem a funguje i za běžného provozu. Studený venkovní vzduch je nasáván několika otvory, které jsou umístěny v horní části ve stěně kontejnmentu. Ten dále proudí dolů mezi betonovou stěnou a přepážkou a poté nahoru mezi přepážkou a ocelovou stěnou. Úkolem přepážky je chlazení ocelové stěny kontejnmentu po celém jeho obvodu. Bez oddělovací přepážky by vzduch proudil pouze

v horní části a prakticky by nic neochlazoval. Ohřátý vzduch proudí směrem ke komínu a odvádí se ven tzv. komínovým efektem. Teplo z kontejnmentu je přes ocelovou obálku předáváno vzduchu za pomoci přirozené konvekce. V případě velmi těžké havárie je kolem komínu umístěna nádrž, která slouží pro gravitační sprchování ocelové obálky v případě těžké havárie. Další funkcí těchto systémů je také snižování tlaku v kontejnmentu, což je nutné pro udržení hermetičnosti kontejnmentu. Kondenzát, který vzniká díky vnějšímu chlazení kontejnmentu, následně stéká do IRWST. Při překročení mezní hodnoty přetlaku v kontejnmentu se armatury otevřou a voda začne proudit gravitačním spádem na ocelovou obálku. Voda stékající po ploše ocelové obálky kontejnmentu se postupně vypařuje. Voda v nádrži vystačí chladit kontejnment po dobu 72 hodin a během této doby se může nádrž postupně doplňovat z vnějších zdrojů. V případě, že nádrž nebude možno doplňovat, tak systém přirozené cirkulace vzduchu po třech dnech dokáže ocelovou obálku uchlazit sám. [5], [17], [32]



Obrázek 4-5: Schéma pasivního systému chlazení kontejnmentu [17]

4.1.5 Řešení havárií

4.1.5.1 Havárie typu LOCA

Tímto názvem je definován případ, kdy se ve větvi v primárním okruhu vytvoří nějaká trhлина, tím dojde k poklesu tlaku v potrubí. Zároveň uniká chladicí médium. Což má za následky nedostatečné chlazení jaderného reaktoru.

Zde je v bodech řešení havárie LOCA s pasivním chlazením aktivní zóny a odvodem zbytkového tepla z kontejnmentu:

1) Kompenzátor objemu

Ten při vytvoření nějaké trhliny v primárním okruhu zareaguje jako první. Cílem kompenzátoru objemu je vyrovnání chybějícího množství chladiva v primárním okruhu, které uniklo v důsledku poškození potrubí a také jeho tlak. Díky tlaku páry, který se nachází v prostoru nad hladinou v kompenzátoru, je chladivo z něj přiváděno do primárního okruhu. Kompenzátor objemu je připojen na horké větvi, která propojuje parogenerátor s reaktorem.

2) Vysokotlaké doplňování – CMT

CMT jsou uvedeny do provozu v případě, že se vypnou hlavní cirkulační čerpadla a zároveň se začne zahřívat studená větev. Dále, že hladina chladiva v kompenzátoru objemu klesne na určitou výšku. Reaktor má dva CMT, ty jsou naplněny bórovou vodou. Oba jsou napojeny do reaktoru jako doplňovací potrubí. Funkčnost CMT je založena na gravitaci a rozdílu teplot a tlaků.

3) Odvod zbytkového tepla

Při spuštění CMT se zároveň spustí i systém odvodu zbytkového tepla z aktivní zóny. Odvod zbytkového tepla se provádí pomocí výměníku tepla nazývaného PRHR HX, který je umístěn přímo v zásobovací nádrži. PRHR HX je činný v případě, kdy není umožněn klasický odvod tepla z primárního okruhu za pomoci parogenerátorů. Teplá strana PRHR HX je napojena na horkou větev, ta je napojena na kompenzátor objemu a přivádí do PRHR HX horkou vodu, která je následovně ochlazována a dále proudí do parogenerátoru. Potrubí je spojeno s primárním okruhem a je odděleno za pomoci armatur, které jsou při běžném provozu uzavřeny. Armatury se otevřou, pokud dostanou signál od měřících a kontrolních systémů, tedy v případě, jsou-li překročeny parametry tlaku a teploty v potrubí primárního okruhu. Médium proudí ve výměníku přirozeně za pomoci rozdílu teplot a výškovém umístění vstupu horké a výstupu studené vody.

4) Čtyřstupňové odtlakování systému

Za situace, že hladina v CMT poklesne na určitou úroveň, nastane odtlakování systému. V systému je použito třístupňové snižování tlaku, to pracuje tak, že na kompenzátor objemu jsou napojeny tři potrubí a každé má paralelně zapojeny tři armatury. Dále potrubí ústí do IRWST. V případě, že hladina chladicího média v CMT klesne na hranici 20 % celkového objemu, aktivuje se čtvrtý stupeň odtlakování, který je napojen na horkou větev PRHR HX. Čtvrtý stupeň tvoří dvě potrubí, každé se dvěma armaturami. Tento stupeň snižuje tlak, aby došlo k chlazení aktivní zóny za pomoci gravitačního spádu z IRWST.

5) Hydroakumulátory - středotlaké doplňování

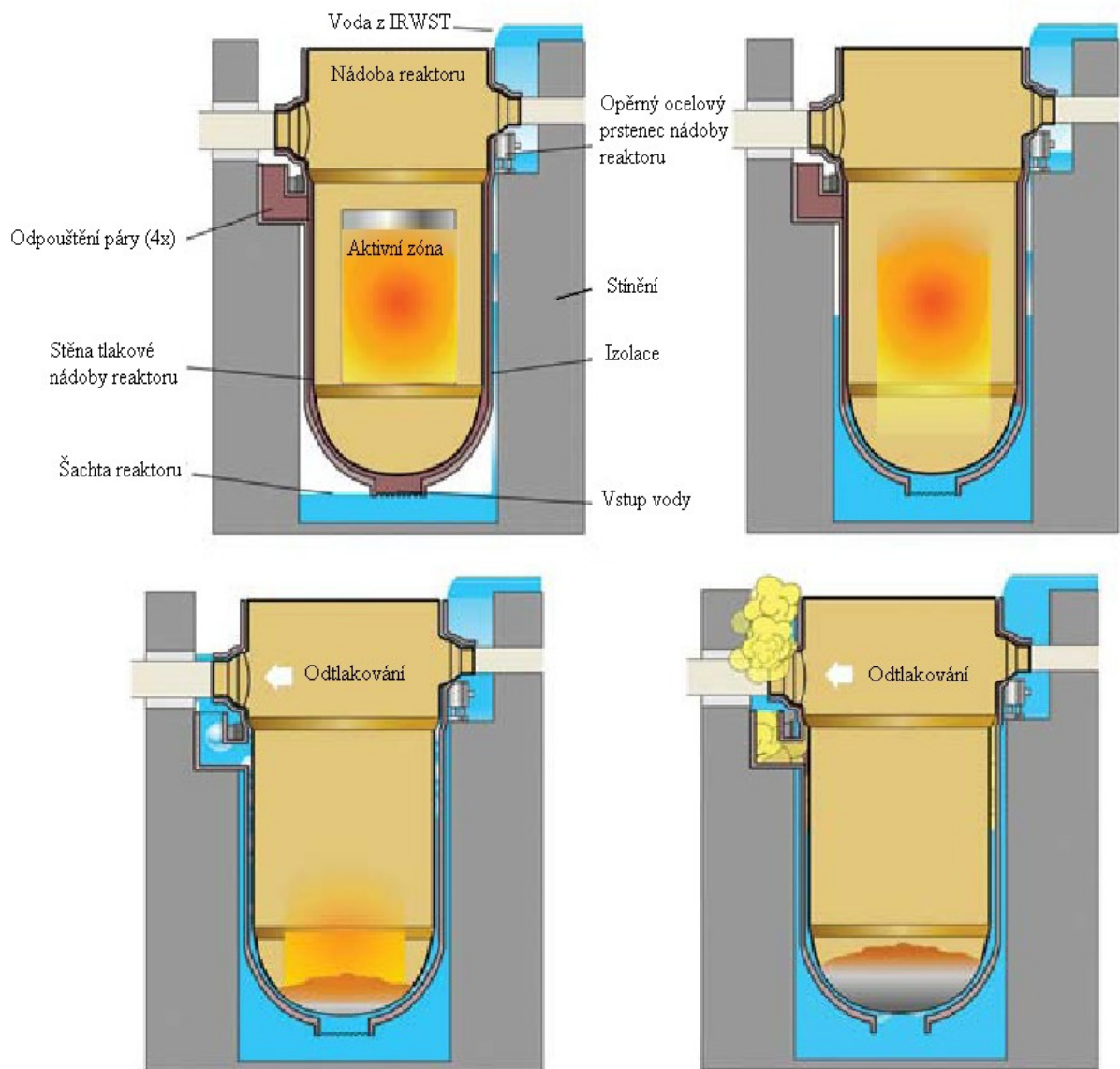
Dříve než je aktivován čtvrtý stupeň odtlakování, je aktivován středotlaký systém doplňování chladiva pomocí hydroakumulátorů. Hydroakumulátory jsou napojeny na potrubí, které vede z CMT do reaktoru a jsou natlakovány na tlak 4,826 MPa plynem na bázi dusíku. Začnou být činné ve chvíli, kdy v potrubí mezi reaktorem a CMT klesne tlak na takovou hodnotu, že se tlakem plynu v hydroakumulátorech otevřou zpětné klapky. Následně při otevření těchto klapek proudí chladné médium z hydroakumulátorů do reaktoru, čímž se chladí aktivní zóna. Při vyčerpání chladiva v hydroakumulátorech se aktivuje čtvrtý stupeň automatické dekomprese a systém chlazení aktivní zóny pomocí IRWST.

6) IRWST (nizkotlaké doplňování)

IRSWT je velká nádrž, která slouží, k výměně chladiva. Je uložena nad systémem havarijního chlazení reaktoru a nad smyčkami primárního okruhu uvnitř kontejnmentu. Na hladině je atmosférický tlak, tudíž nádrž není nijak natlakovaná. Právě proto je zařazen na poslední řadu, co se týče havarijního chlazení aktivní zóny. Teprve až dojde k vyčerpání chladiva z hydroakumulátorů, začne proudit chladivo z IRWST. Pokud by se stalo, že tlak uvnitř potrubí by se blížil atmosférickému tlaku, chladicí médium začne proudit do reaktoru gravitačním spádem. Potrubí, které vede z IRWST je připojeno na potrubí vedoucí z CMT do reaktoru. Další chladivo dodává potrubí vedoucí z jímky kontejnmentu, které je napojeno na potrubí IRWST – reaktor. Jedná se o poslední stupeň, při němž je část kontejnmentu zaplavena. V důsledku horké vody proudící do nádrže IRWST se vytvářejí bubliny horké radioaktivní páry, které směřují k hladině, tam se uvolní do prostoru nad hladinou. V nádrži IRWST je umístěn PRHR HX, který vodu v nádrži ohřívá. Díky ohřátí vody se voda začne vypařovat. To potom řeší systém pasivního chlazení kontejnmentu, který páru zkondenzuje a kondenzát steče po stěnách kontejnmentu zpátky do IRWST. [5], [13], [32]

4.1.5.2 Havárie typu tavení aktivní zóny

Projekt AP1000 řeší havárii typu tavené aktivní zóny úplně jiným způsobem než projekt MIR-1200. Projekt řeší tuto havárii za pomoci reaktorové nádoby, která taveninu zachytí. Následně je použito vnější chlazení a únik vzniklých radioaktivních plynných látek do atmosféry kontejnmentu. Princip řešení této havárie je zobrazen na obrázku č. 4-6. V případě, že dojde k havárii s tavením aktivní zóny, tak se otevřou armatury IRWST a chladicí médium vstupuje do prostoru mezi betonovým základem a reaktorovou nádobou. Při přítoku vody se zaplní dno až do doby, kdy začne vstupovat voda do tepelné izolace, která izoluje reaktorovou nádobu do šachty reaktoru. Voda začne postupně stoupat mezi stěnou tepelné izolace a stěnou reaktoru a chladí reaktor z vnější strany. Z důvodu vysokých teplot vzniká pára, která stoupá do volného prostoru kontejnmentu. Současně je zaplaven reaktor a dochází k přímému styku vody s taveninou. Vzniklá pára proudí přes systém odtlačování v kompenzátoru objemu do kontejnmentu. Díky vnějšímu chlazení ocelové stěny kontejnmentu se pára zkondenzuje a kondenzát stéká zpět do IRWST. Tento systém je dostatečný k tomu, aby roztavená aktivní zóna nijak nepoškodila ocelovou tlakovou obálku reaktoru a tím tedy neunikla do kontejnmentu. Díky udržení roztavené aktivní zóny v reaktorové nádobě nedojde k situaci, při které by mohlo dojít k explozi a následně k úniku radioaktivních látek a ionizujícího záření ven mimo kontejnment a tím k narušení životního prostředí. [5], [11], [18], [32]



Obrázek 4-6: Princip řešení havárie s tavením aktivní zóny [18]

4.2 Atomstroyexport MIR-1200



Obrázek 4-7: 3D model jaderné elektrárny s reaktorem MIR-1200 [19]

4.2.1 Společnost Atomstroyexport

S rozhodnutím Ruského ministerstva pro atomovou energii vznikla v roce 1998 společnost ATOMSTROYEXPORT. Tato společnost vznikla sloučením Atomenergoexport a Zarubezhatomenergostroy, které měly více než 25 let zkušeností se zahraničními státy v oblasti konstrukce, provozu a modernizace jaderných elektráren.

Tato společnost působí v rámci společnosti Rosatom, která působí v oblasti jaderné energetiky více než 50 let. V době masivního rozvoje jaderné energetiky byla jediným dodavatelem zařízení pro jaderné elektrárny. Dominance společnosti na jaderně-energetickém trhu socialistických států má za následek, že od 60. let dvacátého století bylo postaveno 65 bloků jaderných elektráren s reaktory typu VVER. Tento typ reaktoru je provozován v postkomunistických zemích jako je Maďarsko, Slovensko, Bulharsko a ve světě např. v Číně. Bloky VVER jsou provozovány také v jaderné elektrárně Dukovany, jedná se o čtyři bloky o výkonu 440 MW. Další bloky jsou nainstalovány v jaderné elektrárně Temelín, zde se jedná o dva bloky o výkonu 1000 MW.

Společnost Atomstroyexport se zabývá těmito aktivitami:

- Projektování
- Dodávky zařízení
- Montáž
- Uvedení do provozu
- Údržba

- Opravy a modernizace
- Vyřazení z provozu a likvidace

Společnost má tedy schopnost zabezpečit všechny činnosti, které se týkají celkového životního chodu jaderné elektrárny. Zároveň zajišťuje činnosti týkající se hospodaření s vyhořelým jaderným palivem a radioaktivním odpadem. Nejnovějším projektem Rosatomu je moderní reaktor MIR-1200. Na tomto projektu se podílí dvě dceřiné společnosti firmy Rosatom, jedná se o Atomstroyexport a OKB Hidroress, které spolupracují se ŠKODA JS. Jde o modernizovaný lehkovodní jaderný reaktor. Principy tohoto reaktoru jsou odvozeny od reaktoru VVER1000. Nyní je ve výstavbě 12 bloků, z toho 7 v Rusku. [20], [21], [22], [32]

4.2.2 Konstrukce a parametry

Principálně je primární okruh s reaktorem MIR-1200 řešen jako dřívější reaktor VVER 1000. Primární okruh tvoří reaktorová nádoba, čtyři parogenerátory, čtyři hlavní cirkulační čerpadla a kompenzátor objemu. V primárním okruhu jsou zabudovány další zařízení a systémy, které slouží k zajištění bezpečnosti. Některé z nich pracují i za běžného provozu. Základní parametry reaktoru MIR-1200 jsou uvedeny v tabulce č. 4-2.

<u>Jaderná elektrárna</u>	
Instalovaný výkon	1160 MWe
Účinnost (čistá)	33,70%
Projektová životnost	50 let
<u>Reaktor</u>	
Tepelný výkon	3200 MWt
<u>Aktivní zóna</u>	
Palivo	obohacený uran v podobě UO_2 (palivo obsahuje vyhořívající absorbátor gadolinium)
Obohacení	4,79%
Počet palivových souborů	163
Počet absorpčních tyčí	121
Palivový cyklus	12 měsíců
<u>Systém chlazení reaktoru</u>	
Počet chladicích smyček	4
Pracovní tlak	16,2 MPa
Teplota chladiva na vstupu	298,2 °C
Teplota chladiva na výstupu	328,9 °C
Průtok chladiva reaktorem	23,9 m³/s
<u>Parogenerátor</u>	
Počet na výrobní blok	4
Odběr páry z 1 parogenerátoru	1602 t/hod
Tlak páry na výstupu	7 MPa
Teplota páry na výstupu	285,8 °C
<u>Kontejnment – vnitřní obálka</u>	
	- předepjatý beton + ocelová vystýlka
Průměr (vnitřní)	44 m
Tloušťka stěny	1,2 m
Projektový tlak	0,4 MPa
<u>Kontejnment – vnější obálka</u>	
	- předepjatý beton
Průměr (vnitřní)	50 m
Výška	70,2 m
Tloušťka stěny	0,8 m (ve válcové části)
<u>Turbosoustrojí</u>	
Počet na výrobní blok	1
Počet dílů turbíny	1 vysokotlaký + 4 nízkotlaké
Otáčky	3000

Tabulka 4-2: Základní technické parametry jaderné elektrárny MIR-1200 [20]

Projekt MIR-1200 je vylepšen oproti VVER v těchto bodech:

- Zvýšení elektrického výkonu
- Zvýšení tepelného výkonu
- Zvýšení tlaku páry na výstupu z generátoru
- Zmenšení tlakových ztrát v hlavním parovodu na 0,2 Mpa
- Konstrukce kontejnmentu
- Bezpečnostní systémy
- Programovatelný digitální systém kontroly a zařízení
- Účinnost jaderné elektrárny
- Doba výstavby jaderné elektrárny
- Životnost jaderné elektrárny

Největší změnou oproti jaderné elektrárně VVER 1000 je konstrukce kontejnmentu. Kontejnment je tvořen ze dvou plášťů. Vnější plášť je z železobetonu a je projektován proti vnějším jevům, jako jsou letecká nehoda, vnější výbuch, zatížení sněhem nebo ledem, hurikán či zemětřesení. Vnitřní plášť je tvořen z betonu a je konstruován na tlak 0,5 MPa a teplotu 150 °C a je vybaven ocelovou vystýlkou. Zde je rozdíl oproti AP1000, kde vnitřní plášť je zhotoven z oceli.

Jak již bylo zmíněno, tak primární okruh MIR-1200 je řešen obdobně jako VVER 1000, ale kvůli zvyšování parametrů dochází ke změně rozměrů komponent primárního okruhu. Tyto změny se projevují u tlakových nádob, čerpadel, armatur aj. U projektu MIR-1200 se rozměry zvětšily. Konstrukční řešení jaderné elektrárny MIR-1200 vychází ze zkušeností, přičemž jsou využity nejnovější technologie. Díky tomu je dosažen větší výkon, dodržena vyšší bezpečnost a delší životnost.

Bezpečnost projektu je založena na těchto bodech:

- Princip ochrany do hloubky
- Zahrnutí požadavků mezinárodních agentur
- Zkušenosti z dosud používaných reaktorů
- Zahrnutí pravděpodobnostních a deterministických analýz
- Výsledky podpořené výzkumnou činností

Bezpečnost je charakterizována těmito systémy:

- Čtyři bezpečnostní trasy
- Dvojitý kontejnment
- Zvýšená seismická odolnost
- Rekombinátory vodíku, lapač roztavené aktivní zóny
- Pasivní systém odvodu zbytkového tepla z kontejnmentu
- Pasivní systém odvodu tepla z parogenerátoru
- Nezávislost na externích zdrojích energie po dobu 72 hodin.

Bezpečnostní systémy se rozdělují do dvou skupin:

- Aktivní bezpečnostní systémy
- Pasivní bezpečnostní systémy [20], [21], [22], [32]

4.2.3 Aktivní bezpečnostní systémy

Principiálně jsou aktivní bezpečnostní systémy rozepsány v kapitole 4.1.3.

Mezi základní aktivní bezpečnostní systémy patří:

- Vysokotlaká čerpadla k dávkování roztoku kyseliny borité
- Nízkotlaká čerpadla havarijního dochlazování
- Sprchový systém
- Vysokotlaké vstřikování kyseliny borité
- Havarijní napájení parogenerátorů
- Havarijní odvod paroplynové směsi z parogenerátorů
- Havarijní odvod paroplynové směsi z horní části jaderného reaktoru [20], [21], [22], [32]

4.2.4 Pasivní bezpečnostní systémy

Principiálně jsou pasivní bezpečnostní systémy rozepsány v kapitole 4.1.4.

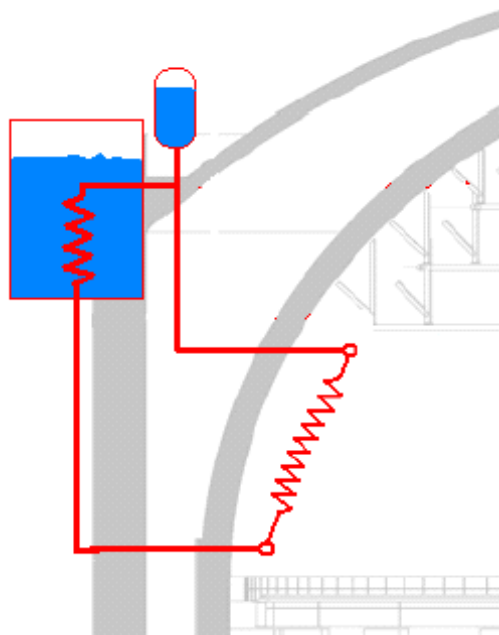
Mezi základní pasivní bezpečnostní systémy patří:

- Pasivní odvod tepla z kontejnmentu
- Pasivní odvod tepla z parogenerátoru
- Lapač roztavené aktivní zóny
- Pasivní chlazení roztavené aktivní zóny
- Hydroakumulátory
- Pasivní likvidace vodíku v kontejnmentu
- Systém regulačních tyčí v reaktoru
- Ochrana před přetlakováním primárního okruhu [20], [21], [22]

4.2.4.1 Pasivní systém odvodu tepla z kontejnmentu

Schéma systému je na obrázku č. 4-8 a 4-9. Tento systém má za úkol odvod tepla z kontejnmentu za normálního provozu, ale i v případě těžkých havárií typu LOCA a tavení aktivní zóny. Systém je funkční i v případě, že selže sprchový systém nebo pokud dojde k výpadku dodávky elektrické energie do jaderné elektrárny. Systém je založen na principu přirozené cirkulace, což má za důsledek, že nejsou potřeba žádná čerpadla. V kontejnmentu vzniká teplý vzduch, ten ohřívá vodu, která proudí přes výměník umístěný uvnitř kontejnmentu. Ohřátá voda proudí do tepelného výměníku, který se nachází v akumulační

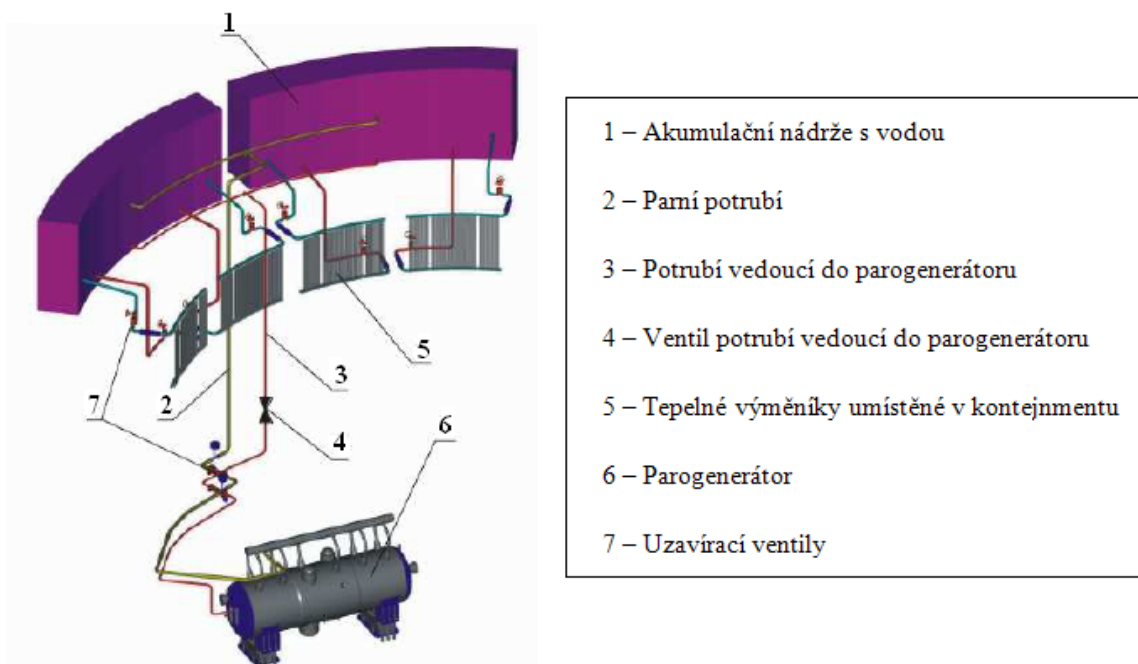
nádrži mimo kontejnment. V akumulační nádrži probíhá přenos tepla z teplé vody na studenou. Nádrž má snímače hladiny a v případě nízké hladiny je doplněna přes čerpadlo. [20], [21], [22], [32]



Obrázek 4-8: Schéma pasivního systému odvodu tepla z kontejnmentu projektu MIR-1200 [21]

4.2.4.2 Pasivní systém odvodu tepla z parogenerátoru

Schéma systému je na obrázku č. 4-9. Tento systém funguje podobně jako pasivní systém odvodu tepla z kontejnmentu. V případě, že selžou čerpadla určené k doplňování napájecí vody do parogenerátorů nebo dojde k havárii typu LOCA je aktivován systém pasivního odvodu tepla z parogenerátoru. Při již zmíněných selhání systémů se parogenerátor celý zaplní vodou z akumulační nádrže. Tím vzniká parovodní směs, ta proudí do výměníku tepla. Výměník je v akumulační nádrži, kde se voda ochladí a proudí potrubím zpět do parogenerátoru. Smyslem tohoto systému je, aby zabránil roztavení aktivní zóny. Snižuje následky havárie, při které dochází k úniku chladicího média z primárního do sekundárního okruhu. [20], [21], [22], [32]



Obrázek 4-9: 3D model pasivního odvodu tepla z parogenerátorů a z kontejnmentu [21]

4.2.4.3 Lapač roztavené aktivní zóny

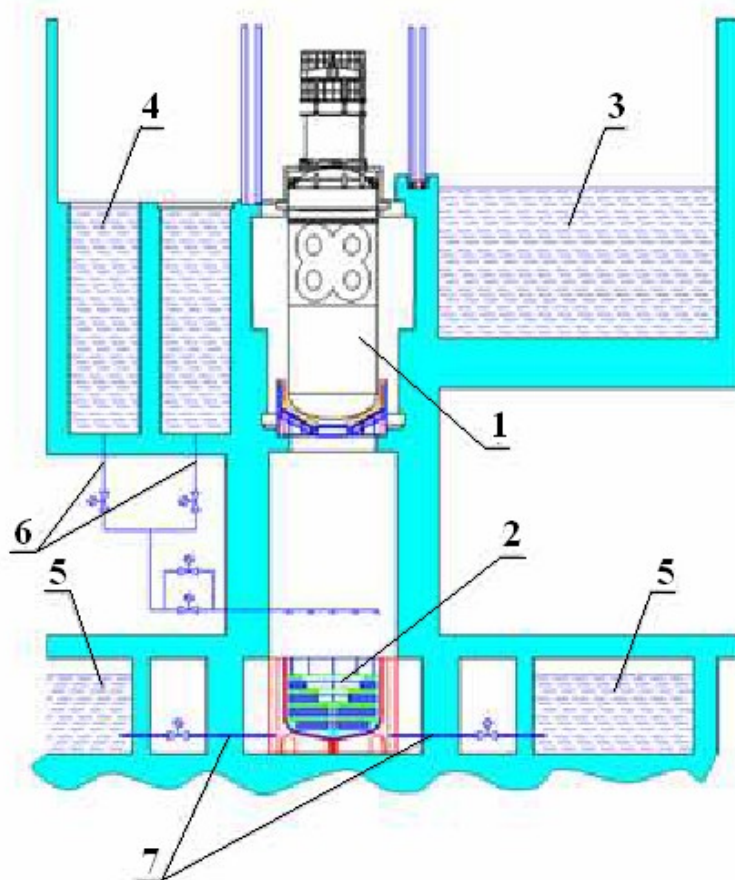
V případě této havárie, při které se protaví reaktorová nádoba teče tavenina k lapači roztavení aktivní zóny. Toto zařízení také zajišťuje menší vyprodukování plyných produktů, které se tvoří z roztavené aktivní zóny a chlazení taveniny. Díky tomu je sníženo tepelné a tlakové namáhání vnitřního kontejnmentu. Zároveň je tavenina chlazena bórovou vodou díky sprchového systému. Tento systém je založen na gravitaci. Lapač roztavené aktivní zóny má tvar dutiny a ta je celá vybetonovaná. V této dutině je nainstalován výměník tepla, který chladí roztavenou aktivní zónu. Výměník je potrubním systémem propojen se zásobními šachtami s vodou. Médium chladí roztavenou aktivní zónu po stranách a ze spodní části. Vnitřní koš tepelného výměníku je tvořen speciální ocelovou strukturou, která je na bázi oxidu hlinitého a oxidu železitého.

Již zmíněný materiál má tyto funkce:

- Umožňuje kontakt roztavení aktivní zóny s tepelným výměníkem.
- Chladicí voda s tímto materiálem zajišťuje omezení tvorby plyných produktů z roztavené aktivní zóny.
- Funguje jako absorbér tepla a zajišťuje roztavenou aktivní zónu v podkritickém stavu.

Při havárii může dojít k uvolnění reaktorové nádoby. Následkem by bylo poškození lapače roztavené aktivní zóny například propadem reaktorové nádoby. Tím by došlo k poškození výměníku tepla. Proti této situaci je nad tepelným výměníkem umístěna betonová

vyztužená deska, která zabraňuje propadu reaktorové nádoby a tím chrání lapač roztavené aktivní zóny a výměník tepla. [5], [32]



1 – Reaktor, 2 – Lapač roztavené aktivní zóny, 3 – Bazén výměny paliva, 4 – Kontrolní šachty reaktoru, 5 – Zásobování šachty s vodou, 6 – Potrubí dodávající vodu k roztavené aktivní zóně, 7 – Potrubí mezi zásobními šachtami s vodou a tepelnými výměníky v lapači aktivní zóny

Obrázek 4-10: Lapač roztavené aktivní zóny a systém plnění vodou [21]

4.2.4.4 Systém kontroly vodíku v kontejnmentu

Vodík vznikne radiolýzou vody a koroze. V kontejnmentu jsou umístěny rekombinační zařízení, které slouží k udržení přípustné koncentrace vodíku, aby nedošlo k havárii. Tyto zařízení fungují na principu zpětné reakce, kdy se vodík sloučí s kyslíkem. U projektu MIR-1200 se používají katalytické rekombinátory. Liší se od tepelných rekombinátorů, které pracují při teplotách kolem 600 až 700 °C tím, že umožňují rekombinaci vodíku na vodu již při teplotách 0 °C. Katalytické rekombinátory mohou pracovat ve velkém rozsahu teplot a vlhkostí při koncentracích vodíku okolo 1 %. [5], [32]

5 NÁVRH ODVODU ZBYTKOVÉHO TEPLA Z BAZÉNU ELEKTRÁRNY MIR-1200

5.1 Teorie sdílení tepla

5.1.1 Obecné poznatky

Přenos nebo také sdílení tepla se označuje jako transport tepelné energie mezi tělesy o nestejně teplotě nebo uvnitř určitého tělesa mezi místy o nestejně teplotě. Teplo neboli tepelná energie vzniká přeměnou jiných druhů energií. Chemické, jaderné a zářivé přeměny se využívají nejvíce pro energetické, technologické a otápěné účely. Současně ale představují i možnou příčinu vzniku požáru či jiné nebezpečné havárie.

Jsou tři základní druhy sdílení tepla:

- a) Vedením - kondukcí
- b) Prouděním - konvekcí
- c) Zářením neboli sáláním - radiací

V mém případě se zajímám o přenos tepla prouděním (konvekcí) [23], [24]

5.1.2 Sdílení tepla prouděním (konvekcí)

K přenosu tepla prouděním dochází například při styku kapaliny nebo plynu s nějakou pevnou stěnou. Výpočty sdílení tepla použijeme v praktickém životě často, např. při volném proudění v atmosféře nebo médiem (kapalina, plyn) obtékaná nějaká tělesa (trubky, deska apod.). Přenos tepla mezi médiem a povrchem pevného tělesa při jejich styku nazýváme přestup tepla. Pro vyjádření tepelného toku při sdílení tepla prouděním platí tento vztah:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta t, \quad [\text{W}] \quad (5.1)$$

kde α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] je součinitel přestupu tepla, S [m^2] značí plochu stěny či trubky a Δt [$^{\circ}\text{C}, \text{K}$] označuje rozdíl teplot ohřivaného (ochlazovaného) média. Proudění média se ještě rozděluje na volné a nucené, kdežto volná (přírodní) konvekce vzniká díky vztlakovým silám, které jsou spojeny s hustotou a teplotou proudícího média. Nucená konvekce je termín, používaný při proudění vyvolaném vnějšími činiteli jako je např. čerpadlo nebo ventilátor. [24], [25]

5.2 Výměník tepla

Výměník tepla je zařízení, které umožňuje účinný přenos tepla z jednoho média do druhého. Tato média o různých teplotách mohou být rozdělena pevnou stěnou - teplosměnnou plochou. Jedná se o stěnu trubky nebo desky.

5.2.1 Rozdělení výměníků tepla

a) Podle vzájemného proudění médií

- Souproudé – proudění médií je rovnoběžné a ve stejném smyslu.
- Protiproudé – proudění médií je rovnoběžné ale v opačném směru.
- Křížové – osy proudů jsou na sebe kolmé, svírají tedy úhel 90° .
- S kombinovaným prouděním

b) Podle způsobu předávání tepelné energie

- Rekuperační – obě média jsou od sebe nepropustně oddělena teplosměnnou plochou.
- Regenerační – média se v pracovním prostoru střídavě vyměňují.
- Kontaktní – obě média se v pracovním prostoru smíchají, tak si předají svou tepelnou energii a poté jsou od sebe odděleny.
- Směšovací – média se smíchají a vytvoří tak homogenní směs.

c) Podle způsobu přenosu tepla

- Konvekční – o množství předaného tepla rozhoduje hlavně médium, které proudí.
- Sálavé – většina tepla se předává sáláním.
- Kombinované – kombinace dvou předchozích.

d) Podle kombinace teplonosných médií

- Voda – voda
- Pára – voda, vzduch, olej
- Spaliny – voda, pára, vzduch

e) Podle účelu použití

- Ohříváky – médium v nich zvyšuje svou teplotu beze změny fáze.
- Chladiče – ochlazované médium snižuje svou teplotu, ale nedochází ke změně fáze.
- Výparníky a odparky - kapalně médium, které je ohříváno se mění v páru.
- Kondenzátory – ochlazovaná pára se mění v kapalinu.
- Přehříváky a mezipřehříváky – jsou určeny ke zvyšování teploty mokré, syté a přehřáté páry.
- Sušárny – při dodání tepla se snižuje vlhkost látek v pevné fázi.
- Termické odplyňování vody – ohřev vody parou až do bodu varu dochází k vylučování pohlcených plynů.
- Topná tělesa ústředního vytápění – médium ohřívá vzduch v okolí.

V mém případě se jedná o výměník s kombinovaným prouděním, s rekuperačním způsobem předání tepelné energie, konvekčním přenosem tepla a smyčkou, kterou je součástí výparník s médiem voda-voda a kondenzátor s médiem pára-vzduch. [26], [27]

5.3 Vyhořelé palivo

5.3.1 Složení vyhořelého paliva

Vyhořelé jaderné palivo (VJP) se skládá ze širokého spektra jednotlivých složek. Jeho složení závisí na:

- druhu použitého paliva (oxid uraničitý UO_2 , oxid plutoničitý ($\text{UO}_2:\text{ThO}_2$), oxid thoričitý ($\text{UO}_2:\text{PuO}_2$), karbidy, nitridy, karbonitridy, oxikarbonitridy uranu, thoria i plutonia
- typu reaktoru, ve kterém bylo palivo použito,
- místě uložení paliva v reaktoru,
- energetickém spektru neutronů, kterým byl jaderné palivo ozářeno,
- stupni hoření,
- tepelném výkonu,
- době pobytu, kterou jaderné palivo strávilo během provozu v aktivní zóně reaktoru (2 až 4 roky)

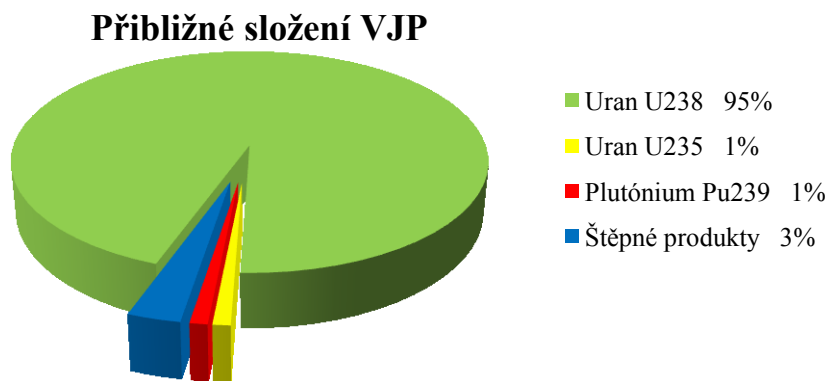
Lehkovodní jaderný reaktor MIR-1200 spotřebuje za jeden rok cca 30 tun jaderného paliva. Jedna tuna VJP má vysokou hustotu a proto objem 30 tun vyhořelého paliva je zhruba $1,5 \text{ m}^3$, což je zanedbatelné množství oproti produkci uhelných elektráren, které mají mnohem

větší produkci odpadů. Na obrázku č. 5-1 je graficky znázorněno množství izotopů ve vyhořelém jaderném palivu. V *Příloze A* je uvedena tabulka s vybranými izotopy z palivového článku v reaktoru VVER 400 (Dukovany) a VVER 1000 (Temelín). V *Příloze B* jsou uvedeny ekologicky významné izotopy jednotlivých skupin a jejich poločas rozpadu. Radionuklidy je nutno z technologických a hlavně z bezpečnostních důvodů během provozu periodicky odstraňovat.

Mezi nejzákladnějšími radionuklidy, které se začínou tvořit při provozu jaderné elektrárny patří:

- Štěpné produkty - vzácné plyny ^{85}Kr a ^{133}Xe , izotopy jódu ^{131}I a ^{133}I , ^{90}Sr , ^{134}Cs a ^{137}Cs
- Aktivační korozní produkty - ^{51}Cr , ^{55}Fe , ^{57}Mn , ^{60}Co , ^{59}Ni , ^{65}Zn
- Aktivační produkty chladiva - H , ^{14}C , transurany, a to zejména ^{239}Pu

Mezi nejtěžší prvky patří **aktinidy**, které jsou nestabilní a rozpadají se. Kvůli dlouhému poločasu rozpadu se v přírodě stále vyskytují uran a thorium jako „pozůstatky exploze supernovy“. Při ozáření uranu nedochází v reaktoru jen k jeho štěpení, ale i zachytu neutronu a vytvoření nového těžšího aktinidu. VJP obsahuje skoro všechny aktinidy, nejvíce ale plutonium a amerícium. Aktinidy společně se štěpnými produkty představují významnou složku radiotoxicity paliva. Štěpné produkty mají krátké poločasy rozpadu a tato doba není z hlediska inženýrských bariér nijak důležitá. U aktinidů je to však opačně. Aktinidy se často rozpadají alfa rozpadem, tím se vyprodukují další, většinou radioaktivní prvky. [28]



Obrázek 5-1: Množství izotopů ve vyhořelém jaderném palivu

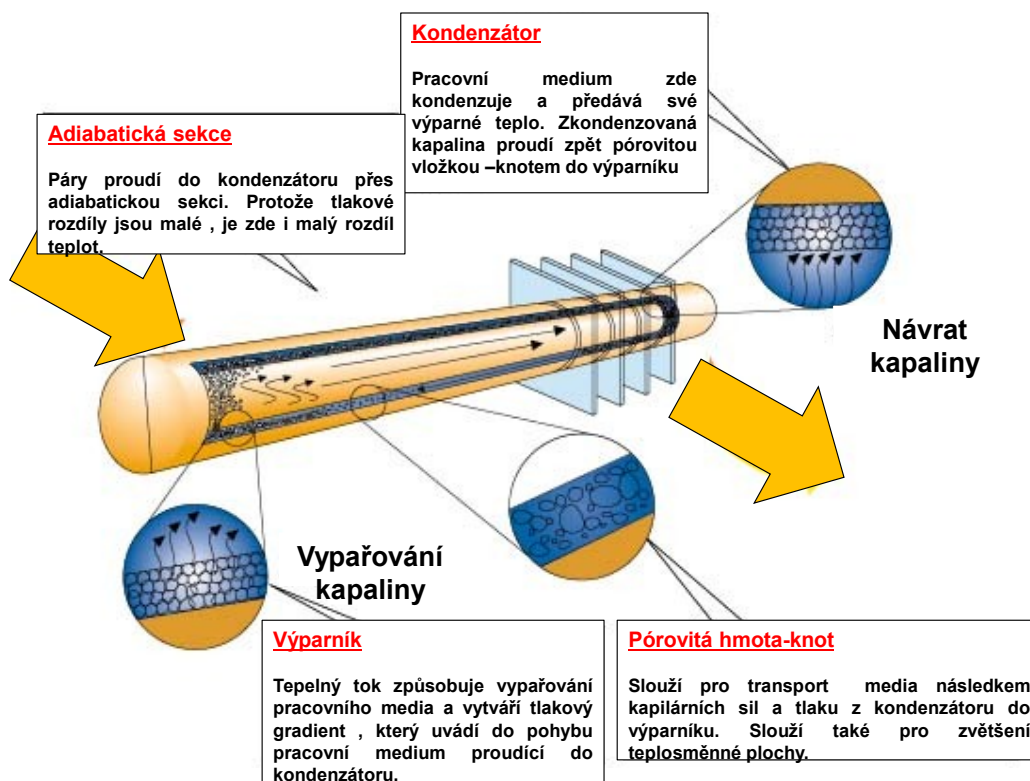
5.3.2 Zbytkové teplo vyhořelého jaderného paliva

Po vyhoření jaderného paliva se nahromadí velké množství štěpných produktů, aktinidů a aktivačních produktů. Díky těmto izotopům dojde ve vyhořelém jaderném palivu k uvolňování tepla, které se nazývá zbytkové teplo (viz *Příloha C*). To je zapotřebí nějakým způsobem odvádět. Proto se musí vyhořelé palivo po vyjmutí z reaktoru skladovat několik let (nejčastěji 10 let) v bazénech, jež jsou nedílnou součástí reaktoru. V opačném případě by docházelo ke zvýšení teploty, ta by vysoko přesahovala hodnotu 100 °C. To by mělo za následek zahřívání okolí, tím by došlo k poškození kontejneru a mohlo by dojít ke katastrofě. Vyhořelé jaderné palivo je po deseti letech vyjmuto z bazénu a je vloženo do kontejneru. Kontejner se umístí do meziskladu, kde je dále skladováno 40 až 50 let, než se rozhodne o jeho dalším uložení. [28]

5.4 Systém smyčkových tepelných trubíc

5.4.1 Tepelná trubice

Navrhovaný výměník funguje na principu tepelných trubíc. Princip je popsán na obrázku č. 5-2. Smyčkový systém tepelných trubíc tvoří výparník, který je namontovaný uvnitř bazénu a kondenzátor, který je nainstalován mimo primární kontejnment reaktoru jak je znázorněno na obrázku č. 5-5. Tento systém je zhotoven tak, aby neustále odváděl tepelný výkon zbytkového tepla štěpných produktů a minoritních aktinidů z jaderného paliva. Výparník je složen z 95 svislých trubek o vnějším průměru 0,0508 m, délce 8 m a tloušťce 0,002 m. Přirozená konvekce ochlazuje kondenzátor, který se skládá ze 126 trubek o stejném průměru a délce 4 m. Materiál tepelné trubice je nerez ocel SUS-316L s vnitřním titanovým obložení. Složení materiálu: Fe, < 0,03 C [%], 16-18,5 Cr [%], 10-14 Ni [%], 2-3 Mo [%], < 2 Mn [%], < 1 Si [%], < 0,045 P [%], < 0,03 S [%]. [29]



Obrázek 5-2: Princip tepelné trubice [29]

5.4.2 Termická analýza smyčkové tepelné trubice

Na základě tepelných údajů z bazénu a geometrii tepelné trubice byl určen tepelný výkon smyčky. Mezi teplotou vody v bazénu kde je 40 °C a okolní atmosférou 30 °C, je větší počet přenosů tepla vedením a prouděním založených na uspořádání tepelných odporů jak je uvedeno v tepelném schématu na obrázku č. 5-8.

Vedení tepla přes válcovou trubku

$$R_{cond} = \frac{\ln \left[\frac{D_o}{D_i} \right]}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \quad [\text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (5.2)$$

kde D_o [m] je vnější průměr, D_i [m] je vnitřní průměr, L [m] je délka trubky a k [W/m.K] je tepelná vodivost trubky (pro ocel SUS $k = 16$ [W/m.K])

Konvekční tepelný odpor

$$R_{conv} = \frac{1}{\alpha_A} \quad [\text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (5.3)$$

kde α [W/(m².K)] je součinitel přestupu tepla při kondenzaci a varu a písmeno A značí teplosměnnou plochu.

Součinitel α_e při varu ve výparníku lze vypočíst z Imurovy korelace

$$\alpha_e = 0,32\chi \left(\frac{P_{in}}{P_o} \right)^{0,3} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.4)$$

kde P_{in} [Pa] je vnitřní tlak a P_o [Pa] je okolní tlak tepelné trubice a součinitel χ [-] vypočítáme dle rovnice (5.5)

$$\chi = \frac{\rho_l^{0,65} \cdot \lambda_l^{0,3} \cdot c_{pl}^{0,7} \cdot g^{0,2} \cdot q_e^{0,4}}{\rho_v^{0,25} \cdot L^{0,4} \cdot \mu_l^{0,1}} \quad [-] \quad (5.5)$$

kde ρ_l [kg.m⁻³] je hustota kapaliny, λ_l [W.m⁻¹.K⁻¹] je tepelná vodivost kapaliny, c_{pl} [J.kg⁻¹.K⁻¹] je měrná tepelná kapacita kapaliny, g [m.s⁻²] je zrychlení následkem gravitace, q_e [W] je tepelný tok ve výparníku, ρ_v [kg.m⁻³] je hustota páry a μ_l [kg.m⁻¹.s⁻¹] je dynamická viskozita kapaliny.

Součinitel α_c při kondenzaci lze vypočíst z Nusseltovy korelace

$$\alpha_c = 0,925 \left(\frac{\lambda_l^3 \cdot \rho_l^2 \cdot g \cdot L}{\mu_l \cdot q_c \cdot l_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.6)$$

kde q_c [W] je tepelný tok v kondenzátoru l_c je latentní teplo.

Součinitel α_{w-e} z vody do výparníku na vnějším povrchu je odvozen z následujících rovnic:

$$\alpha_{w-e} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_l}{l} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.7)$$

kde,

$$\text{Nu} = \left[c_1 \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_w} \right)^{0,21} \cdot \text{Ra}_x^{\frac{1}{4}} \right]; \quad 10^4 \leq \text{Ra}_x \leq 4 \cdot 10^9 \sim 3 \cdot 10^{10} \quad [-] \quad (5.8)$$

$$c_1 = \frac{3}{4} \left(\frac{\text{Pr}}{2,4 + 4,9 \cdot \sqrt{\text{Pr}} + 5 \cdot \text{Pr}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad [-] \quad (5.9)$$

$$\text{Ra}_x = \text{Gr} \cdot \text{Pr} \quad [-] \quad (5.10)$$

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_w - T_\infty) \cdot x^3}{\mu_\infty^2} \quad [-] \quad (5.11)$$

$$x = \frac{l}{2} \quad [m] \quad (5.12)$$

kde index ∞ a w vyjadřují vlastnosti kapaliny v bazénu při přirozeném proudění (T_∞) a výparníku (T_w) při teplotě stěny. Písmeno l je délka trubice výparníku. T , μ , Pr , g a β jsou teplota, dynamická viskozita kapaliny, Prandtlovo kritérium, zrychlení následkem gravitace a tepelná roztažnost při střední teplotě vody (T_m).

$$T_m = \left(\frac{T_\infty + T_w}{2} \right) \quad [^\circ C, K] \quad (5.13)$$

Součinitel α_{c-a} ze stěny kondenzační tepelné trubice do vnějšího prostředí

$$\alpha_{c-a} = 0,45 \cdot \left(\frac{\lambda_a}{D_o} \right) \cdot \left(\frac{D_o \cdot G_{max}}{\mu_a} \right)^{0,625} \cdot \left(\frac{A_f}{A_o} \right)^{-0,375} \cdot \left(\frac{C_{pa} \cdot \mu_a}{\mu_a} \right)^{-0,375} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (5.14)$$

kde λ_a [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] je tepelná vodivost vzduchu, D_o [m] je vnější průměr trubky kondenzátoru, G_{max} [$kg \cdot m^{-2} \cdot hod^{-1}$] je hmotnostní průtok vzduchu, A_f [m^2] je plocha žebor, A_o [m^2] je plocha kondenzátorové trubky, c_{pa} [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] je měrná tepelná kapacita vzduchu a μ_a [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$] je dynamická viskozita vzduchu.

Rovnice (5.14) platí pro: $5 \leq A_f/A_o \leq 12$

Pro žebrovaný výměník tepla, tedy kondenzátor, je efektivní žebrovaná plocha pro přenos tepla určena účinností žebor a součinitelem α_{c-a} z žebor do vzduchu. Celkovou účinnost žebra značím písmenem η_o .

Celkový tepelný odpor smyčkové teplené trubice se značí jako R_o , ten je vyjádřen podle rovnice (5.15)

$$R_o = \frac{1}{\alpha_{w-e} \cdot A_{eo}} + \frac{\ln \left[\frac{D_{eo}}{D_{ei}} \right]}{2 \cdot \pi \cdot k_e \cdot L_e} + \frac{1}{\alpha_e \cdot A_{ei}} + \frac{1}{\alpha_c \cdot A_{ei}} + \frac{\ln \left[\frac{D_{co}}{D_{ci}} \right]}{2 \cdot \pi \cdot k_c \cdot L_c} + \frac{1}{\alpha_{c-a} \cdot A_{ci} \cdot \eta_o} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (5.15)$$

kde dolní indexy eo , ei značí vnější a vnitřní výparník a co , ci značí vnější a vnitřní kondenzátor. A je plocha, D, L je průměr a délka tepelné trubice, k_e, k_c jsou teplené vodivosti výparníkových a kondenzátorových trubek pro nerez ocel. [29]

5.5 Prostup tepla povrchem s žebry

Pokud je třeba sdílet teplo z média s vysokým součinitelem přestupu tepla do média s nízkým součinitelem přestupu tepla, je velikost zařízení určena nižším ze dvou součinitelů. Kdyby bylo zařízení vybudováno jen z hladkých teplosměnných ploch, muselo by být neúměrně velké. Tato problematika se řeší tak, že se zvětší teplosměnný povrch jen na straně, kde je větší tepelný odpor (tj. kde je menší součinitel přestupu tepla). Nejsnadněji jde zvětšit teplosměnný povrch tím, že potřebnou stranu opatříme žebry. Typickým příkladem takového opatření jsou kalorifery. To jsou výměníky, ve kterých se ohřívá plyn teplem předávaných nejčastěji kondenzující párou.

Při navrhování kaloriferu vycházíme z rovnice

$$q = k_z \cdot A \cdot t_{1s} \quad [\text{W}] \quad (5.16)$$

kde Q [W] je tok tepla, k_z [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] je součinitel přestupu tepla žebrovaným povrchem, A [m^2] je velikost teplosměnné plochy a index $1s$ značí logaritmickou střední hodnotu rozdílu teplot teplejšího média t_A a chladnějšího média t_B na koncích výměníku. Vztahy pomocí kterých lze vypočítat hodnotu k_z , se liší pro různá geometrická uspořádání a podmínky toku tekutiny. Pro příklad zde uvádím vzorec (5.17) na zařízení instalované v laboratoři, které je tvořeno svazkem trubek s radiálními kruhovými žebry konstantní tloušťky.

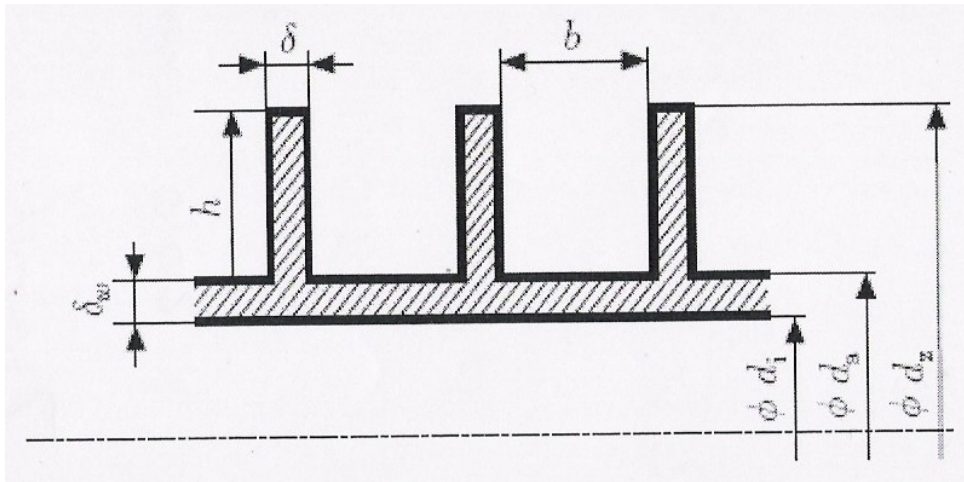
Trubky jsou orientovány kolmo na směr proudění plynu (tekutiny B). Pro takový případ lze použít pro výpočet k_z vztahu

$$\frac{1}{k_z} = A_c \left[\frac{1}{\alpha_z(A_c - (1 - \Omega)A_z)} + \frac{1}{A_i} \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} \right) \right] \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (5.17)$$

Význam jednotlivých veličin ve vztahu (5.17) je tento: A_c [m^2] je celková plocha žebrovaného povrchu trubky, A_i [m^2] je plocha vnitřní (hladké) stěny trubky, A_z [m^2] je plocha povrchu žeber, α_i [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] je součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubky, α_z [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] je součinitel přestupu tepla na žebrované straně, δ_w [m] je tloušťka stěny trubky, λ_w [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] je součinitel tepelné vodivosti materiálu trubky a žeber a Ω [%] je účinnost žeber.

Re	C ^a	p
30 - 1000	0,48	0,5
$1 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$	0,24	0,6
$2 \cdot 10^5 - 1,6 \cdot 10^6$	0,14	0,84

Tabulka 5-1: Součinitele pro Nussoltovo kritérium [30]



Obrázek 5-3: Osový řez trubkou s kruhovými radiálními žebry [30]

$$Nu = C \cdot Re^p \quad [-] \quad (5.18)$$

Máme n žeber na trubce o vnitřním průměru d_i , vnějším průměru trubky d_a a vnějším průměru žebra d_z . Vzdálenosti mezi žebry i koncových žeber od stěny aparátu je b , tloušťka žebra δ a výška žebra $h = (d_z - d_a)/2$ (viz obrázek č. 5-3) Platí

$$A_z = \frac{\pi \cdot n (d_z^2 - d_a^2)}{2} \quad [\text{m}^2] \quad (5.19)$$

$$A_c = \pi(n + 1) \cdot b \cdot d_a + A_z \quad [\text{m}^2] \quad (5.20)$$

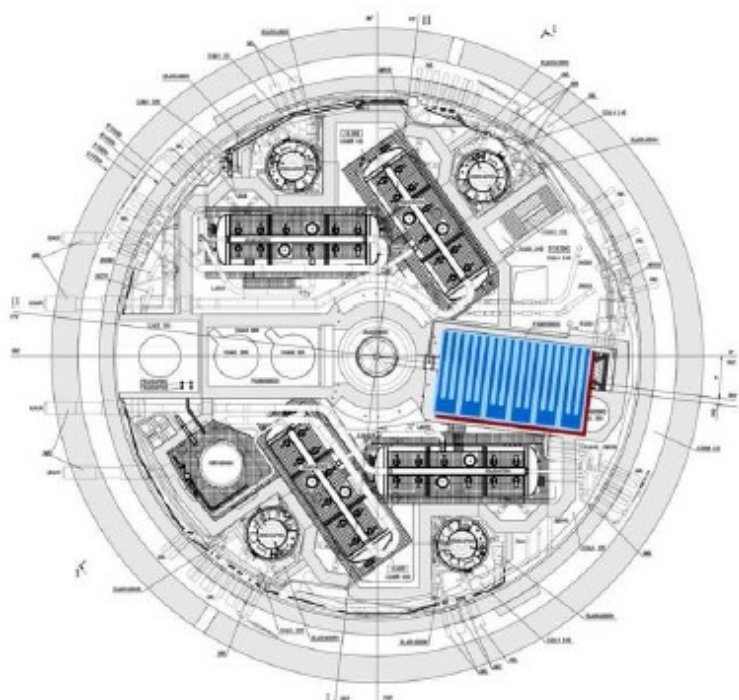
Je-li délka trubky L , pak

$$A_i = \pi \cdot L \cdot d_i \quad [\text{m}^2] \quad (5.21)$$

[30]

5.6 Výpočtová část

Již zmiňovaný výměník navrhují k bazénu na vyhořelé palivo, který se nachází uvnitř kontejnmentu JE projektu MIR-1200 (viz obrázek č. 5-4)



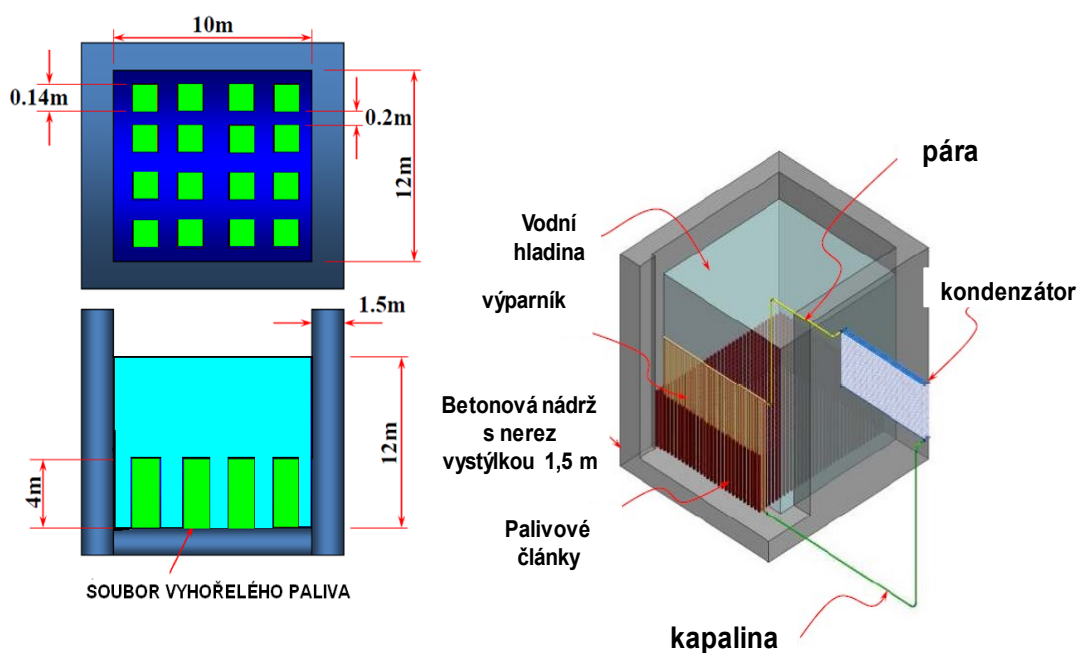
Obrázek 5-4: Půdorys kontejnmentu projektu MIR-1200 [19]

Vyhořelé palivo neustále produkuje nějaké teplo, tuto teplotu je třeba nějakým způsobem snížit. K tomu slouží bazén. V bazénu se nachází 400 souborů vyhořelého paliva. Dohromady produkují 525 kW tepla. Rozměry bazénu a zjednodušené schéma uložení tepelného výměníku je ukázáno na obrázku č. 5-5.

Předpoklady:

Počet vyhořelých palivových článků v bazénu je 420. Po 30 dnech chlazení v reaktoru je vyhořelé palivo přemístěno do bazénu.

Produkce tepelného výkonu je $420 \cdot 1250 = 525\,000$ [W]



Obrázek 5-5: Rozměry bazénu + navrhované zjednodušené schéma systému smyčkových tepelných trubíc [31]

5.6.1 Kondenzátor

Rozměry kondenzátoru jsou zakótovány na obrázku č. 5-6.

5.6.1.1 Plocha kondenzátoru

Vnitřní plocha trubky:

$$A_{tci} = \pi \cdot D_{ci} \cdot L \quad [m^2] \quad (5.22)$$

D_{ci} ...vnitřní průměr trubky [m]

L ... délka trubky [m]

$$A_{tci} = \pi \cdot 46,8 \cdot 4 = 0,59 \quad [m^2]$$

Vnitřní plocha kondenzátoru:

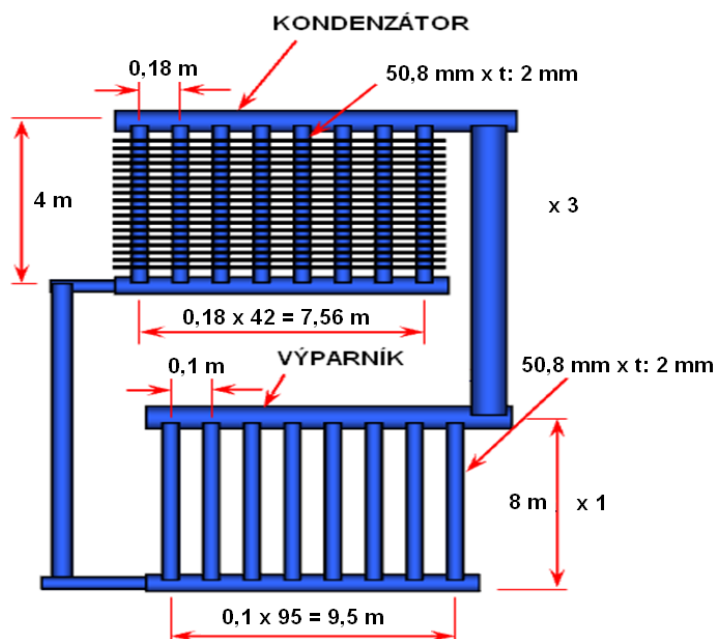
$$A_{ci} = A_{tci} \cdot n_c \quad [m^2] \quad (5.23)$$

n_c ...počet trubek kondenzátoru [1]

$$A_{ci} = 0,59 \cdot 126 = 74 \quad [m^2]$$

Vnější plocha kondenzátoru:

$$A_{co} = 868 \quad [\text{m}^2]$$



Obrázek 5-6: Rozměry kondenzátoru a výparníku [31]

5.6.1.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí

Reynoldsovo číslo

$$\text{Re} = \frac{\omega_a \cdot D_{co}}{\nu_a} \quad [1] \quad (5.24)$$

ω_a ...rychlost proudu vzduchu [m.s⁻¹]

pro proudění vzduchu volím $\omega_a = 1$ [m.s⁻¹]

ν_a ...kinematická viskozita [m².s⁻¹]

pro 40 °C volím $\nu_a = 16,9 \cdot 10^{-6}$ [m².s⁻¹]

$$\text{Re} = \frac{1 \cdot 0,051}{16,96 \cdot 10^{-6}} = 3007 \quad [1]$$

Nusseltovo číslo

$$\text{Nu} = c \cdot \text{Re}^p \quad [1] \quad (5.18)$$

$$\text{Nu} = 0,24 \cdot 3007^{0,6} = 29,3 \quad [1]$$

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_{c-a} = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_{co}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.25)$$

$$\alpha_{c-a} = \frac{29,3 \cdot 2,753 \cdot 10^{-2}}{0,051} = 15,82 \div 16 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

5.6.2 Výparník

Rozměry výparníku stejně jako rozměry kondenzátoru jsou zobrazeny na obrázku č. 5-6.

5.6.2.1 Plocha výparníku

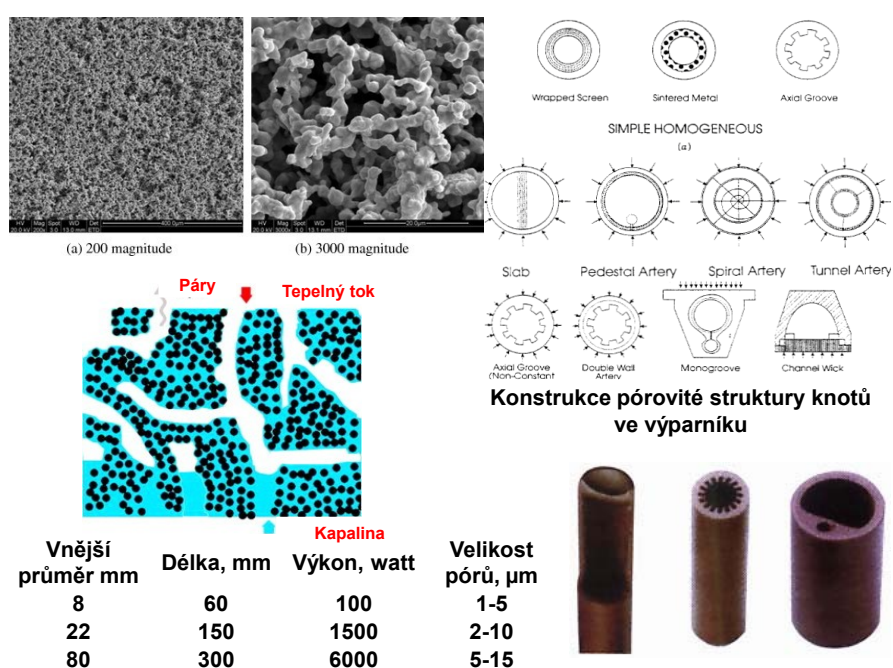
Vnitřní plocha trubky

$$A_{tei} = \pi \cdot D_{ei} \cdot L_e \quad [m^2] \quad (5.26)$$

$$A_{tei} = \pi \cdot 0,0468 \cdot 8 = 1,18 \quad [m^2]$$

$$D_{ei} \dots \text{vnitřní průměr trubky výparníku} \quad [m]$$

$$L_e \dots \text{délka trubky} \quad [m]$$



Obrázek 5-7: Konstrukce výparníkové trubky [29]

Vnitřní plocha výparníku

$$A_{ei} = A_{tei} \cdot n_e \quad [m^2] \quad (5.27)$$

n_e ... počet trubek [1]

$$A_{ei} = 1,18 \cdot 95 = 112 \quad [m^2]$$

Vnější plocha trubky

$$A_{teo} = \pi \cdot D_{eo} \cdot L_e \quad [m^2] \quad (5.28)$$

D_{eo} ... vnější průměr trubky [m]

L_e ... délka trubky [m]

$$A_{teo} = \pi \cdot 0,0508 \cdot 8 = 1,28 \quad [m^2]$$

Vnější plocha výparníku

$$A_{eo} = A_{teo} \cdot n_e \quad [m^2] \quad (5.29)$$

n_e ... počet trubek [1]

$$A_{eo} = 1,28 \cdot 95 = 121 \quad [m^2]$$

5.6.2.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí

Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{\omega_l \cdot D_{eo}}{\nu_l} \quad [1] \quad (5.30)$$

ω_l ... rychlost proudu kapaliny [m.s⁻¹]

pro proudění kapaliny volím $\omega_l = 0,25$ [m.s⁻¹]

ν_l ... kinematická viskozita kapaliny [m².s⁻¹]

pro 30 °C volím $\nu_l = 0,8 \cdot 10^{-6}$ [m².s⁻¹]

$$Re = \frac{0,25 \cdot 0,051}{0,8 \cdot 10^{-6}} = 15937 \quad [1]$$

Nusseltovo číslo

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad [1] \quad (5.31)$$

Pr ..Prandtlovo číslo, pro teplotu 35°C Pr = 4,8 [1]

$$Nu = 0,023 \cdot 15937^{0,8} \cdot 4,8^{0,4} = 99,1 \quad [1]$$

Součinitel přestupu tepla

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} \Rightarrow \alpha_{w-e} = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_{eo}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.32)$$

$$\alpha_{w-e} = \frac{99,1 \cdot 62 \cdot 10^{-2}}{0,051} = 1205 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

5.6.3 Výpočet celkového potřebného odporu

Tepelný odpor jedné smyčky

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_{w-e} \cdot A_{eo}} + \frac{1}{\alpha_e \cdot A_{ei}} + \frac{1}{\alpha_c \cdot A_{ci}} + \frac{1}{\alpha_{c-a} \cdot A_{co}} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (5.33)$$

$$R_1 = \frac{1}{1205 \cdot 121} + \frac{1}{5000 \cdot 112} + \frac{1}{5000 \cdot 74} + \frac{1}{16 \cdot 868}$$

$$R_1 = 8,34 \cdot 10^{-5} \quad [K \cdot W^{-1}]$$

Potřebný odpor pro celý systém

$$R_{potř} = \frac{\Delta T}{Q_{VJP}} \quad [K \cdot W^{-1}] \quad (5.34)$$

$$R_{potř} = \frac{40 - 30}{525 \cdot 10^3} = 1,9 \cdot 10^{-5} \quad [K \cdot W^{-1}]$$

Počet potřebných smyček

$$n_s = \frac{R_1}{R_{potř}} \quad [1] \quad (5.35)$$

$$n_s = \frac{8,34 \cdot 10^{-5}}{1,9 \cdot 10^{-5}} = 4,38 \Rightarrow 5 \text{ smyček} \quad [1]$$

5.6.4 Výpočet chlazení vody v bazénu

Zbytkové teplo na jednu smyčku

$$Q_o = \frac{Q_{VJP}}{n_s} \quad [\text{kW}] \quad (5.36)$$

$$Q_o = \frac{525}{5} = 105 \quad [\text{kW}]$$

Časová konstanta

$$T = c_{pl} \cdot m \cdot \frac{R_1}{n_s} \quad [\text{s}] \quad (5.37)$$

$$T = 4170 \cdot 937500 \cdot \frac{8,34 \cdot 10^{-5}}{5} = 65208 \quad [\text{s}]$$

Teplota za 65208 sekund

$$\frac{t_\tau - 30}{40 - 30} = e^{-\frac{\tau}{T}} \quad (5.38)$$

$$t_\tau = 10 \cdot e^{-\frac{65208}{65208}} + 30 = 33,7 \quad [^\circ\text{C}]$$

$$\frac{65208}{3600} = 18,1 \quad [\text{h}]$$

Voda se ochladí ze 40 °C na 33,7 za 18,1 hodin.

5.6.5 Výpočet ohřevu bez ochlazení

Z tohoto výpočtu zjišťuji, na jakou teplotu se bazén ohřeje v případě, že výměník nebude v provozu 24 hodin. Z rovnice 4.19 si vyjádřím teplotu t.

$$Q_{VJP} = m \cdot c_{pl} \cdot \frac{dt}{d\tau} \quad [\text{W}] \quad (5.39)$$

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{Q_{VJP}}{m \cdot c_{pl}}$$

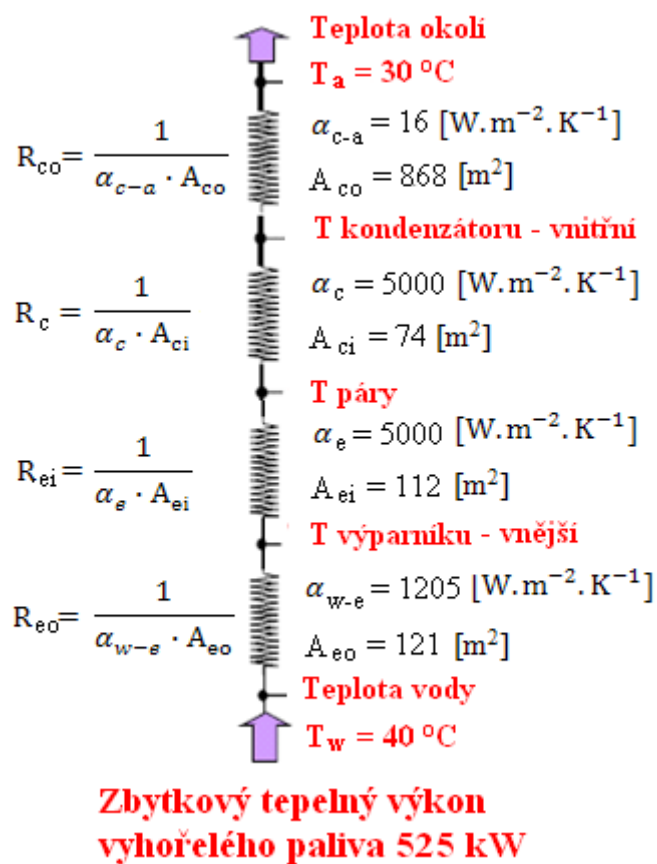
$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{525000}{937500 \cdot 4170} = 1,34 \cdot 10^{-4}$$

$$dt = 1,34 \cdot 10^{-4} \cdot d\tau$$

$$t = 1,34 \cdot 10^{-4} \tau + c = 1,34 \cdot 10^{-4} \cdot 24 \cdot 3600 + 30 = 41,6 \quad [^\circ\text{C}]$$

5.7 Souhrnné schéma

Na základě výše uvedeného postupu jsou vypočtené hodnoty pro návrh smyčkových tepelných trubíc zobrazeny v odporovém schématu na obrázku 5-8.

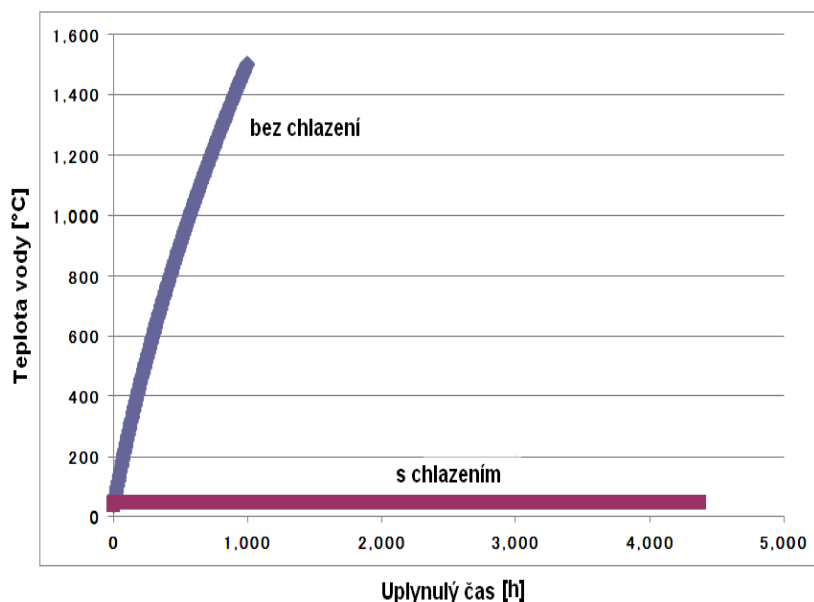


Obrázek 5-8: Odporové schéma s vypočtenýma hodnotama [29]

6 ZÁVĚR

Důležitý rozdíl mezi bezpečnostními systémy je v tom, že aktivní systémy jsou závislé na elektrické energii a hnací síly pasivních systémů jsou založeny na přírodních silách. Mezi reaktory vhodné pro dostavbu dvou bloků (3+4) v jaderné elektrárně Temelín byly vybrány konkrétně reaktory AP1000 a MIR-1200. Tyto projekty můžeme charakterizovat vývojovými pokroky hlavně v oblasti zajištění jaderné bezpečnosti.

Smyčkové tepelné trubice budou moci poskytovat účinný dvoufázový přenos tepla pro efektivní odvod zbytkového tepla bazénu a to bez jakýchkoliv poruch. Maximální dovolená teplota vody v bazénu je 40 °C. Z vypočtených hodnot jsem zjistil, že při použití výměníku se teplota vody ze 40 °C ochladí za dobu 18,1 hodin na 33,7 °C. Tuto teplotu potom výměník nadále udržuje. Pokud by se stalo, že by byl výměník odstaven, voda by se ohřála za 24 hodin na 41,6 °C a za deset dní by mohla stoupnout až na teplotu 400 °C. Tento stav je zobrazen v grafu na obrázku č. 6-1, který ukazuje závislost teploty vody v bazénu na čase v hodinách. Voda by se začala vypařovat a po vypaření celého množství vody by začal vznikat vodík a následně by došlo k explozi. Tím by došlo k úniku radioaktivních látek a poškození životního prostředí. Věřím, že jaderná technologie se za několik desítek let zmodernizuje na tak vysokou úroveň, že jí bude využívat 2x více zemí na světě než dnes a že bude hlavně žádána i mezi největšími kritiky a odpůrci jaderné energie.



Obrázek 6-1: Graf znázorňující závislost teploty vody v bazénu na čase ve dvou případech
[29]

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (*IAEA*) [online]. 1998-2013 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: < <http://www.iaea.org/> >
- [2] STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST (*SÚJB*) [online]. [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: < <http://www.sujb.cz/> >
- [3] ČERNOBYL – *Havárie v jaderné elektrárně Černobyl* [online]. [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: < <http://chernobyl.euweb.cz/> >
- [4] JADERNÁ BEZPEČNOST [online]. [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: < <http://www.jaderna-bezpecnost.cz/riziko-nehody-elektrarny.htm> >
- [5] KOLAT, P. *Úvod do jaderné energetiky* [online]. 2012, s. 178 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: < <http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/JE/JE%20fin.%202012.pdf> >
- [6] CEZ - *Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí*. 2005. [cit. 2013-04-25]. (prospekt)
- [7] WESTINGHOUSE – *The Nuclear Renaissance Starts here (AP 1000)* [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: < <http://ap1000.westinghousenuclear.com/exploreap1000.html> >
- [8] WESTINGHOUSE [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: < <http://www.westinghousenuclear.com/> >
- [9] WESTINGHOUSE – *AP 1000 at a Glance*. [online]. 2012 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: < http://ap1000.westinghousenuclear.com/ap1000_glance.html >
- [10] WESTINGHOUSE – *Reactor*. [online]. 2007 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: < https://www.ukap1000application.com/ap1000_at_a_glance.aspx >
- [11] ALL FOR POWER: INFORMAČNÍ PORTÁL A ČASOPIS – *Westinghouse představil odborné veřejnosti projekt AP1000*. [online]. 2010 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: < <http://www.allforpower.cz/clanek/westinghouse-predstavil-odborne-verejnosti-projekt-ap1000/> >
- [12] BASIC SAFETY PRINCIPLES FOR NUCLEAR POWER PLANTS: *75-INSAG-3 Rev.A I* [online]. Rev. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1999, 97 p. [cit. 2013-04-14]. INSAG series, no. 12. ISBN 92-010-2699-4.

- [13] WESTINGHOUSE – *Pasivní systém chlazení aktivní zóny*. [online]. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: < <http://ap1000.westinghousenuclear.cz/pasivni-system-chlazení-aktivni-zony.html> >
- [14] WESTINGHOUSE – *Bezkonkurenční bezpečnost* [online]. 2007 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: < <http://ap1000.westinghousenuclear.cz/bezkonkurencni-bezpecnost/?PHPSESSID=OsepQXDy3ngiPFxsaJ338WxCno9> >
- [15] WESTINGHOUSE – *Izolace kontejnmentu* [online]. 2007 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: < <http://ap1000.westinghousenuclear.cz/izolace-kontejnmentu.html?PHPSESSID=OsepQXDy3ngiPFxsaJ338WxCno9> >
- [16] WESTINGHOUSE – *Systémy pasivní bezpečnosti* [online]. 2007 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: < <http://ap1000.westinghousenuclear.cz/systemy-pasivni-bezpecnosti/?PHPSESSID=OsepQXDy3ngiPFxsaJ338WxCno9> >
- [17] WESTINGHOUSE – *Pasivní systém chlazení kontejnmentu* [online]. 2007 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: < <http://ap1000.westinghousenuclear.cz/pasivni-system-chlazení-kontejnmentu.html> >
- [18] WESTINGHOUSE – *Ready To Meet Tomorrow's Power Generation Requirements Today* [online], [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: < http://www.westinghousenuclear.com/docs/AP1000_brochure.pdf >
- [19] ČVUT – *Projekt MIR-1200 a aktuální požadavky na bezpečnost jaderných elektráren* [online], [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: < http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/CVUT_MIR_1200_Zdebor.pdf >
- [20] ZDEBOR, R. MIR-1200: projekt nejen pro Českou republiku. *Jaderná energetika*. 2010, č. 1. [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: < <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/skodaJS.pdf> >
- [21] ATOMSTROYEXPORT – *Introduction to the AES – 2006 NPP design based on VVER (PWR) technology* [online], [cit. 2013-02-08]. Dostupné z: < <http://www.atomeromu.hu/download/1675/AES%202006%20reaktor.pdf> >
- [22] ATOMSTROYEXPORT [online]. [cit. 2013-02-08]. Dostupné z: < <http://www.atomstroyexport.com/about/eng/2> >
- [23] WOLF, I., JAREŠOVÁ, M., OUHRABKA, M. Přenos tepla: studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku, s. 1-40. [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: < <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf> >

- [24] BLAHOŽ, V., KADLEC, Z. *Základy sdílení tepla*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 1996, 109 s. ISBN 80-902-0011-7. [cit. 2013-01-15].
- [25] WIKIPEDIA – *Heat transfer* [online]. 2013, [cit. 2013-01-15]. Dostupné z: < http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer#Convection >
- [26] ROSYPAL, Š. *Výměníky tepla: bakalářská práce*. Brno: VUT - Brno, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, 2010, 32 s. Vedoucí práce: Ing. Marek Baláš [cit. 2013-01-18]. Dostupné z: < http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29102 >
- [27] SCHREIBEROVÁ, L., HOLEČEK, O. *Sdílení tepla* [online]. [cit. 2013-01-20]. Dostupné z: < <http://www.vscht.cz/uchi/ped/labchi/T1.pdf> >
- [28] TESAŘ, F. *Odvod tepla a vývin tepla vyhořelého jaderného paliva v úložištích: diplomová práce*. Brno: MU, Pedagogická fakulta, Katedra fyziky, 2011, 65 s. Vedoucí práce: RNDr. Jindřiška Svobodová, Ph.D. [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: < http://is.muni.cz/th/209747/pdf_m/Odvod_tepla_a_vyvin_tepla_vyhoreleho_jaderneho_paliva_v_ulozistich.pdf >
- [29] MOCHIZUKI, M., SINGH, R., NGUYEN, Th., NGUYEN, Ti., MASHIKO, K., SAITO, Y., WUTTIJUMNONG, V. COMPLETELY PASSIVE HEAT PIPE BASED EMERGENCY CORE COOLING SYSTEM FOR NUCLEAR POWER REACTOR. *International Heat Pipe Conference*. [online]. 2012 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: < ftp://77.47.180.135/Books/%D0%9A%D0%9E%D0%9D%D0%A4%D0%95%D0%A0%D0%95%D0%9D%D0%A6%D0%98%D0%98/HPC%20%28Heat%20Pipe%20Conference%29/HPC-16,%20Lyon,%20France%202012/all%20communications/077-16ihpc_Paper_Mochizuki.pdf >
- [30] SCHREIBEROVÁ, L., HOLEČEK, O. *Prostup tepla povrchem s žebry* [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: < <http://www.vscht.cz/uchi/ped/labchi/T2.pdf> >
- [31] SINGH, R., MASATAKA, M. Heat Pipe Based Emergency Cooling System For Removing Decay Heat from Nuclear Reactor and Spent Fuel Pool. *Japan Association of Heat Pipe Meeting, Waseda University*. 2011. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: < http://www.hexag.org/newsletter/articles/docs/emergency_cooling_system.pdf >
- [32] PAVLÍČEK, M. *Přístupy k zajištění jaderné bezpečnosti u reaktorů 3. generace: diplomová práce*. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010, 95 s. Vedoucí práce: prof. Ing. Oldřich Matal, CSc. [cit. 2013-05-10].

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A - Nejvýznamnější izotopy z hlediska aktivity ve VJP VVER-440 a VVER-1000 pro období 0-9 let po vyvezení VJP z reaktoru [28]	63
Příloha B – Ekologicky významné izotopy ve VJP [28]	64
Příloha C – Časová závislost vývinu zbytkového tepla P [W/tU] pro jednotlivé skupiny izotopů ve VJP z reaktoru VVER-1000 pro vyhoření 50 000 [MWd/tU] [28]	65
Příloha D – Časová závislost celkové aktivity jednotlivých skupin izotopů, pro období 0 až 1 milion let pro typ reaktoru VVER-1000, vyhoření 50 000 [MWd/tU] [28]	66

Příloha A - Nejvýznamnější izotopy z hlediska aktivity ve VJP VVER-440 a VVER-1000 pro období 0-9 let po vyvezení VJP z reaktoru [28]

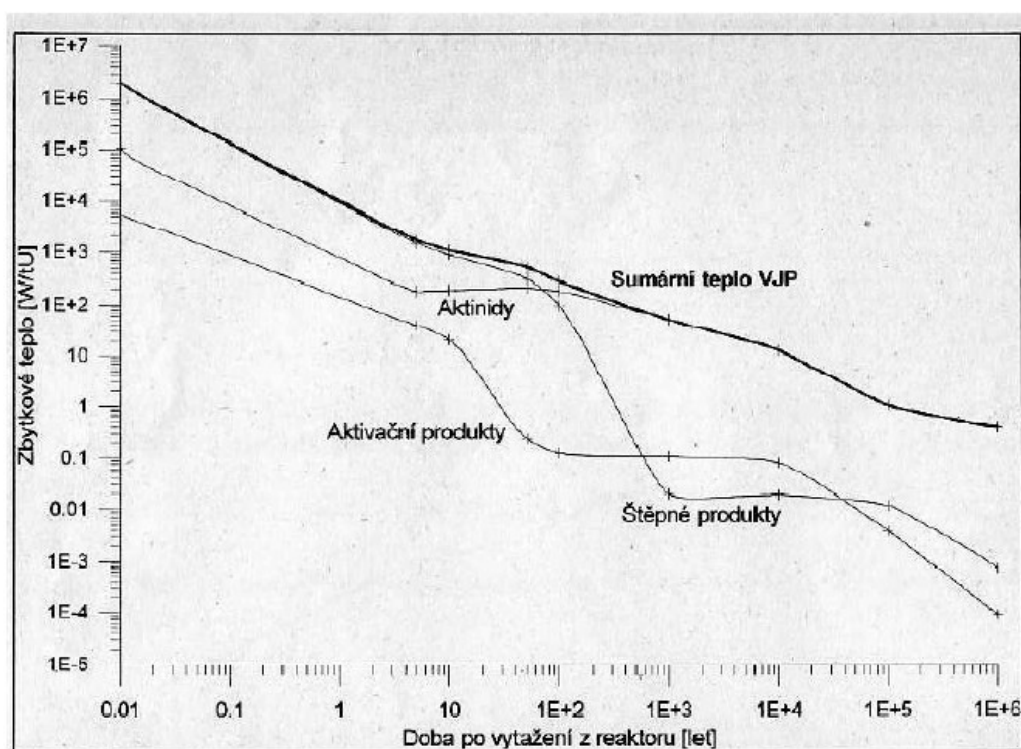
Aktivační produkty	Aktinidy a dceřiné produkty	Štěpné produkty
^{51}Cr	^{239}U	^{90}Sr
^{56}Mn	^{239}Np	^{90}Y
^{55}Fe	^{238}Pu	^{106}Ru
^{60}Co	^{241}Pu	^{106}Rh
^{63}Ni	^{242}Cm	^{134}Cs
^{95}Zr		^{137}Cs
^{97}Zr		$^{137\text{m}}\text{Ba}$
^{95}Nb		^{144}Ce
^{97}Nb		^{144}Pr
$^{97\text{m}}\text{Nb}$		^{147}Pm

Příloha B – Ekologicky významné izotopy ve VJP [28]

Skupina izotopů	Izotop	Poločas rozpadu
Aktivační produkty	^{54}Mn	312,5 dnů
	^{55}Fe	2,75 let
	^{59}Fe	44,53 dnů
	^{60}Co	5,27 let
	^{65}Zn	243,9 dnů
	^{95}Zr	64,9 dnů
	^{95}Nb	35 dnů
	^3H	12,35 let
Aktinidy a dceřinné produkty	^{239}Np	2,36 dnů
	^{238}Pu	87,7 let
	^{239}Pu	$2,411 \cdot 10^4$ let
	^{240}Pu	$6,563 \cdot 10^3$ let
	^{241}Pu	14,35 let
	^{242}Pu	$3,735 \cdot 10^5$ let
	^{241}Am	432 let
	^{242}Cm	162,94 dnů
Štěpné produkty	^{89}Sr	55,5 dnů
	^{90}Sr	28,7 let
	^{90}Y	64,1 hodin
	^{99}Mo	2,747 dnů
	^{103}Ru	39,272 dnů
	^{106}Ru	372,6 dnů
	$^{102\text{m}}\text{Rh}$	56,1 minut
	^{106}Rh	29,92 sekund
	$^{129\text{m}}\text{Te}$	33,6 dnů
	^{132}Te	76,856 hodin
	^{131}I	8,021 dnů
	^{132}I	2,3 hodin
	^{137}Cs	30 let
	$^{137\text{m}}\text{Ba}$	2,55 minut
	^{140}Ba	12,751 minut
	^{140}La	1,6779 dnů
	^{144}Ce	284,45 dnů

Příloha C – Časová závislost vývinu zbytkového tepla P [W/tU] pro jednotlivé skupiny izotopů ve VJP z reaktoru VVER-1000 pro vyhoření 50000 [MWd/tU] [28]

	Doba po vyvezení z reaktoru (let)								
	0	5	10	50	100	1000	10000	100000	1 milion
AP	$7,34 \cdot 10^3$	$8,73 \cdot 10^1$	$4,50 \cdot 10^1$	$3,54 \cdot 10^{-1}$	$1,09 \cdot 10^{-1}$	$7,94 \cdot 10^{-2}$	$5,84 \cdot 10^{-2}$	$2,90 \cdot 10^{-3}$	$9,93 \cdot 10^{-5}$
AKT	$1,43 \cdot 10^5$	$2,56 \cdot 10^2$	$5,08 \cdot 10^2$	$3,97 \cdot 10^2$	$3,14 \cdot 10^2$	$7,42 \cdot 10^1$	$1,87 \cdot 10^1$	1,528	$5,59 \cdot 10^{-1}$
ŠP	$2,25 \cdot 10^6$	$2,41 \cdot 10^3$	$1,38 \cdot 10^3$	$4,60 \cdot 10^2$	$1,41 \cdot 10^2$	$2,98 \cdot 10^{-2}$	$2,83 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$
Celk.	$2,40 \cdot 10^2$	$3,02 \cdot 10^3$	$1,93 \cdot 10^3$	$8,56 \cdot 10^2$	$4,55 \cdot 10^2$	$7,43 \cdot 10^1$	$1,88 \cdot 10^1$	1,549	$5,60 \cdot 10^{-1}$



Příloha D – Časová závislost celkové aktivity jednotlivých skupin izotopů, pro období 0 až 1 milion let pro typ reaktoru VVER-1000, vyhoření 50 000 MWd/tU [28]

